



***ANÁLISE E ESTUDO COMPARATIVO DA ESCOLHA
DE MELHOR TRAÇADO PARA O MINERODUTO DA
FERROUS RESOURCES BRASIL S/A.***

Alberto Franco Lacerda

Trabalho de Projecto apresentado como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Sistemas
de Informação Geográfica

**ANÁLISE E ESTUDO COMPARATIVO DA ESCOLHA DE MELHOR
TRAÇADO PARA O MINERODUTO DA FERROUS RESOURCES
BRASIL S/A.**

Dissertação orientada por:

Professor Doutor Pedro Cabral

com co-orientaçãodo

Geólogo Doutor Fábio Soares Magalhães

Novembro de 2011

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que acompanharam a evolução deste trabalho e que de alguma forma contribuíram para sua elaboração.

Quero agradecer ao professor Pedro Cabral, que apesar da distância física, mostrou-se sempre presente e disponível a sanar minhas dúvidas e auxiliar meu progresso.

Gostaria de agradecer ao meu co-orientador, mentor e amigo, Fábio Soares Magalhães, pelos conselhos, materiais de apoio, orientações e sempre me indicando a direção correta.

À BVP Engenharia, meu muito obrigado pelo tempo cedido ao estudo e em especial ao seu presidente geólogo Sérgio Brito, que sempre me ajudou quando necessitei.

À FERROUS RESOURCES DO BRASIL S/A pela oportunidade de parceria, em especial ao Ronan Pereira Cezar, que sempre se mostrou disponível e prestativo.

De igual modo agradeço a todos os meus amigos e minha família que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado

ANÁLISE E ESTUDO COMPARATIVO DA ESCOLHA DE MELHOR TRAÇADO PARA O MINERODUTO DA FERROUS RESOURCES BRASIL S/A.

RESUMO

Esta dissertação apresenta a elaboração do caminho de menor custo para o mineroduto da Ferrous Ressources do Brasil S/A que se estende da mina de VIGA, no município de Congonhas, Minas Gerais até o município de Presidente Kennedy, no Espírito Santo, passando pelo extremo norte do estado do Rio de Janeiro.

Os dados utilizados nesse projeto foram, em boa parte, cedidos pela própria Ferrous e também adquiridos em websites de órgãos públicos. Para a geração do caminho de menor custo foi realizada, primeiramente, a preparação e conversão dos dados vetoriais em dados matriciais com a mesma resolução. Isso permitiu que todos os dados pudessem ser associados entre si.

Com toda a base de dados organizada e estruturada utilizou-se uma adaptação do método de análise multicritério, *Analytic Hierarchy Process* (AHP) integrado ao ambiente SIG, para avaliar e ponderar cada dado da base de dados.

Com os dados ponderados criou-se uma superfície de custo ao longo de todo o trecho do mineroduto. Utilizando a ferramenta *Least Cost Path* do software ArcGIS foi possível determinar um traçado ótimo para o mineroduto da Ferrous.

O traçado gerado foi comparado com um traçado preliminar desenvolvido previamente pela Ferrous, onde foi possível verificar a eficiência da ferramenta para análises espaciais, além de oferecer melhores condições para trabalhos de campo, uma vez que racionaliza esforços, pessoal e custos.

Como conclusão percebeu-se que um caminho de menor custo ou traçado ótimo não existe. Apenas traçados ótimos relativos podem ser considerados dentro de certas condições. Os parâmetros apresentados e a forma como são valorados podem alterar significativamente os resultados de caminhos de menor custo conforme a etapa e o contexto do projeto. Assim, diversos traçados podem ser gerados e comparados entre si, e com isso se escolher um ótimo traçado dentre os traçados gerados.

ANALYSIS AND COMPARATIVE STUDY OF THE BETTER CHOICE FOR DETERMINING THE FERROUS RESOURCES BRAZIL S/A PIPELINE

ABSTRACT

This dissertation presents the development of least cost path for the Ferrous Resources Brazil S/A pipeline that extends from the VIGA mine in the city of Congonhas, Minas Gerais to the municipality of President Kennedy, in the Espírito Santo estate, through the end north of the state of Rio de Janeiro.

The data used in this project were largely donated by Ferrous and also acquired from government agencies websites. To generate the least cost path, firstly, the preparation and conversion of vector data into raster data with the same resolution was made. This allowed all data could be associated with each other.

With the entire database organized and structured, the method of multicriteria analysis, Analytic Hierarchy Process (AHP) integrated with GIS was used to evaluate and weight each data from the database.

With all the data weighted, it was created a cost surface over the entire stretch of pipeline. Using the Least Cost Path tool from the software ArcGIS, it was possible to determine an optimal route for Ferrous pipeline.

The optimal pipeline generated was compared with the previously *layout* developed by Ferrous, where it was possible to verify the efficiency of the tool for spatial analysis, and provide better conditions for field work, since it rationalizes efforts, staff and costs.

In conclusion it was realized that a path of least cost or optimal path does not exist. Only relative paths can be considered optimal under certain conditions. The parameters presented are valued and how they can significantly alter the results of least cost paths depending on the life history and context of the project. Thus, several paths can be generated and compared, and thus choose an optimal route from the optimal paths generated.

PALAVRAS-CHAVE

Análise Multicritério
Caminho de Menor Custo
Mineroduto
Superfície de Custo

KEYWORDS

Multicriteria Analysis
Least Cost Path
Pipeline
Cost Surface

ACRÓNIMOS

- AHP** - Analytic Hierarchy Process
- ANEEL** - Agência Nacional de Energia Elétrica
- APP** – Áreas de Proteção permanente
- CGEO/CGTIG** - Coordenação de Geoprocessamento
- CGHs** - Centrais Geradoras Hidrelétricas
- DNPM** - Departamento Nacional de Produção Mineral
- ESRI** - Environmental Systems Research Institute
- IBGE** - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- MDT** – Modelo Digital de Terreno
- MMA** - Ministério do Meio Ambiente
- PCHs** - Pequenas Centrais Hidroelétricas
- RIMA** – Relatório de Impacto Ambiental
- RPPN** – Reserva de Propriedade Particular Natural
- SIG** – Sistema de Informação Geográfica
- SIGMINE** - Sistema de Informações Geográficas da Mineração
- TIN** - Triangulated Irregular Network
- UHEs** - Usinas Hidroelétricas
- UTES** - Usinas Termelétricas
- WGS84** – World Geodetic System, 1984

ÍNDICE DO TEXTO

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
PALAVRAS-CHAVE	VI
KEYWORDS	VI
ACRÓNIMOS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Obras lineares de engenharia e Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	1
1.2 Metodologia geral	3
1.3 Objetivos e Justificativa.....	4
1.4 Estrutura da tese.....	5
2. ÁREA DE ESTUDO	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Localização	7
2.3 Domínios Geomorfológicos	8
2.3.1 Região de Escudo Exposto.....	10
2.3.2 Faixas de Dobramento Remobilizado	10
2.3.3 Serras da Zona da Mata Mineira	11
2.3.4 Depressão Escalonada dos Rios Pombo - Muriaé intercalado com Alinhamentos de Cristas do Paraíba do Sul.....	11
2.3.5 Depósitos Sedimentares	12
2.4 Formas de Relevo	12
2.5 Conclusão.....	13
3. DADOS E MÉTODOS	15
3.1 Introdução.....	15
3.2 Dados	15
3.2.1 Dados de base	15

3.2.2	Fotointerpretação	16
3.2.3	Vetorização e Segmentação de Imagens	20
3.2.4	Mapa de Declividade	26
3.2.5	Dados Existentes (Dados de empresas especializadas e órgãos públicos)	30
3.3	Métodos	33
3.3.1	Superfície de Custo	33
3.3.2	Análise multicritério	34
3.3.3	Caminho de menor custo	37
3.4	Conclusão.....	38
4.	ANÁLISE COMPARATIVA DE TRAÇADOS DO MINERODUTO DA FERROUS.....	39
4.1	Introdução.....	39
4.2	Preparação dos dados.....	39
4.3	Análise	44
4.4	Resultados.....	46
4.5	Conclusão.....	59
5.	CONCLUSÃO.....	61
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Tabela de Dados.....	15
Tabela 3.2 – Feições identificadas na fotointerpretação.....	17
Tabela 3.3 – Dados e fontes adquiridos de órgão públicos.....	30
Tabela 3.4 – Dados e relevâncias.....	36
Tabela 3.4 – Dados e relevâncias (Continuação).....	37
Tabela 4.1 – Dados e respectivas ponderações	41
Tabela 4.2 – Dados e respectivas ponderações.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa de localização.....	08
Figura 2.2 - Mapa de Domínios Geomorfológicos e Forma de Relevo (Modificado do PROJETO RADAMBRASIL - 1983).....	09
Figura 3.1 – Detalhe de depósito de pé de encosta identificado nas fotografias aéreas - linha amarela indicativa do mineroduto preliminar.....	18
Figura 3.2 – Detalhe de áreas alagadas ou alagáveis identificadas nas fotografias aéreas. a) visualização da feição na ortofoto, b) curvas de nível como auxílio para identificação da feição, c) feição identificada e vetorizada e d) feição vista na escala de trabalho - linhas pretas indicativas de limites de municípios.....	18
Figura 3.3 – Detalhe da erosão identificada nas fotografias aéreas. a) visualização de erosão na ortofoto, b) erosão com as curvas de nível, c) vetorização e delimitação da feição na ortofoto e d) feição vista na escala de trabalho.....	19
Figura 3.4 – Detalhe do afloramento de rocha identificado nas fotografias aéreas. a) visualização do afloramento de rocha na ortofoto, b) curvas de nível como auxílio para identificação da feição, c) afloramento identificado e vetorizado e d) feição vista na escala de trabalho.....	19
Figura 3.5 - Visualização das feições vetorizadas juntamente com o MDT (modelo digital de terreno).....	20
Figura 3.6 – Exemplo de imagem após diminuição de resolução. a) ortofoto original. b) mesma ortofoto com a resolução espacial modificada.....	22
Figura 3.7 – Segmentação de imagem e início do processo de classificação.....	23
Figura 3.8 – Imagem classificada ilustrando matas (verde escuro), pastagem (verde claro), rios e lagos (azul), afloramento de rocha (vermelho), solo exposto (rosa claro) e áreas urbanizadas (laranja).....	24
Figura 3.9 – Porção da imagem onde as áreas verdes são representadas após o processo de reclassificação.....	25
Figura 3.10 – Exemplo do mapa hipsométrico de uma porção do traçado do mineroduto.....	26
Figura 3.11 – Exemplo do mapa de declividade do terreno (ângulos em graus com a representação do mineroduto)	27
Figura 3.12 – Troncos de árvores recurvados indicam movimento de massa por rastejo	28

Figura 3.13 – Deslocamento do muro de arrimo devido à movimentação do solo.....	29
Figura 3.14 – Alta declividade indicando movimento de massa.....	29
Figura 3.15 – Exemplo dareamostragem dos dados de declividade (modificado da apostila <i>Advanced Raster Spatial Analysis</i> – ESRI).....	34
Figura 3.16 – Três tipos de padrão de vizinhança em dados matriciais (modificado deC. Yu <i>et al.</i> (2003)).....	38
Figura 4.1 – Estrutura hierárquica genérica de problemas de decisão (modificado de Vilas Boas (2011)).....	41
Figura 4.2 – Fluxograma representando a geração do caminho de menor custo para o mineroduto.....	46
Figura 4.3 – Mapa de uso e ocupação e cobertura do solo (destaque para a parte inicial da área de estudo).....	47
Figura 4.4 – Mapa de ponderações (destaque para a parte final da área de estudo).....	48
Figura 4.5 – Mapa de custo (destaque para a parte central da área de estudo).....	49
Figura 4.6 – Diferença de eixos propostos sobrepostos à superfície de custo (em verde).....	50
Figura 4.7 – Diferença de eixos propostos entre os municípios de Itavera e Catas Altas da Noruega, em Minas Gerais, sobrepostos à superfície de custo (em verde).....	51
Figura 4.8 – Eixos propostos seguindo um mesmo trajeto no municípios de Piranga, em Minas Gerais.....	52
Figura 4.9 – Diferença entre eixos próximo área de PCH no município de presidente Bernardes, em Minas Gerais. Validação de critério de ponderação.....	53
Figura 4.10 – Diferença entre eixos próximo área de PCH no município de Itaperuna, no Rio de Janeiro. Validação de critério de ponderação.....	54
Figura 4.11 – Diferença entre eixos devido a problemas com superficiário. O traçado da Ferrou (em vermelho) foi o adotado ao invés do traçado gerado pela função de menor custo (em azul).....	56
Figura 4.12 – Áreas erosivas (parte hachurada na imagem) presentes em alta declividade. O eixo do mineroduto (em vermelho) passando no exutório da bacia. Área de modificação de projeto.....	58
Figura 4.13 – Modelo digital de terreno apresentando a delimitação de micro bacias (em preto) e o eixo do mineroduto (em vermelho).....	59

1. INTRODUÇÃO

1.1 Obras lineares de engenharia e Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

As obras lineares de engenharia (rodovias, ferrovias, dutovias, entre outras) estão presentes em todo o território nacional brasileiro e são extremamente importantes para o desenvolvimento do país. Porém, a implantação destas obras pode conduzir a desequilíbrios tais como aumento de susceptibilidade à erosão, movimentos de massa e assoreamento de cursos d'água, efeitos que podem comprometer a integridade e segurança da obra e de seus usuários.

Desta forma, é impossível planejar e estimar uma rota para uma obra linear sem considerar qualquer estudo/informação geotécnica e/ou geomorfológica para seu traçado. Segundo Marshall e Ruban (1983), trabalhos em obras lineares em Alberta, no Canadá, evidenciaram o alto custo de medidas geotécnicas remediadoras devido a interrupção dos serviços da obra por causa de alguma falha ou ameaça a integridade da mesma.

Os mesmos autores ressaltam que a Engenharia Geotécnica está cada vez mais envolvida em projetos de traçado e construção de dutos nos seguintes aspectos: (a) concepção do traçado; (b) possibilidades de cortes em taludes, travessias de rios e estudos de fundações e estruturas associadas; (c) investigações de subsuperfície quando necessário; (d) implementação do duto com a supervisão da geotecnia; (e) programas de monitoramento do traçado do duto para identificar futuras áreas vulneráveis e (f) medidas de adequação do traçado onde problemas geotécnicos tais como instabilidade de taludes e exposição do duto devido à erosão ocorrerem.

Entretanto, a preocupação em desenvolver um projeto o qual possibilite a minimização de medidas remediadoras, ou seja, que antevê prováveis vulnerabilidades fomentou a entrada de diversos profissionais e a utilização diversificada de ferramentas em estágios mais iniciais de estudos de uma obra linear.

Cada vez mais profissionais e empresas buscam desenvolver melhores estudos nas fases iniciais dos projetos como a avaliação de melhor rota ou a estudos de alternativas uma vez que se evita o retrabalho e estão comprovando ser mais econômicos, pois racionaliza esforços, pessoal e custos.

Gutiérrez *et al.* (2002), em um estudo de melhor rota para um gasoduto no México, afirma que a avaliação de alternativas em um projeto de obra linear é um dos tópicos mais

importantes para maximizar os benefícios e minimizar os custos tanto ambientais quanto de projeto, além de garantir uma maior qualidade para uma decisão sendo mais do que uma mera justificativa de proposta.

A metodologia empregada por Gutiérrez *et al.* (2002) de avaliar um "custo" para alternativas de rotas para o gasoduto é um exemplo que pode ser empregado em setores diversos de planejamento de empresas diversificadas e que possibilita um custo menor pois proporciona diretrizes para as atividades de campo, uma vez que a rota está previamente definida.

O próprio exemplo do projeto do mineroduto da Ferrous Resources do Brasil S/A, ao qual se pretende discutir em detalhes nesta dissertação, ilustra que a etapa de campo poderia ter começado de forma diferente e com resultados mais robustos. Ferramentas mais eficientes requerem um planejamento e uma organização mais estruturada, o que justifica a capacitação de pessoas e, quando necessário, uma atualização da estrutura da base de dados.

O uso de sistemas de informação geográfica (SIG) como ferramenta para estudos de obras lineares também pode ser visto em Augusto Filho *et al.* (2010) ao utilizar o SIG para estocar, manipular, modelar e criar informação da base de dados espaciais para um oleoduto existente no estado de São Paulo, Brasil.

Os mesmos autores utilizam o SIG para análises de decisão multicritério, modelos de avaliação de risco e para o gerenciamento de risco ambiental e geotécnico, uma vez que fatores tanto geotécnicos quanto geológicos podem estar associados com falhas e corrosão nos dutos (influência do pH do solo com o material que é feito o duto).

As características geológico-geotécnicas de um traçado são merecedoras de atenção e uma análise mais detalhada uma vez que estão diretamente relacionadas com possíveis processos de instabilidade de encostas, necessidade de obras de contenção, custo de corte/aterro para instalação do duto, áreas de disposição de material excedente (em caso de corte) ou áreas de empréstimo (em caso de aterro) e que, portanto, podem encarecer um projeto.

Estudos de viabilidade mais criteriosos e projetos básicos bem detalhados contribuem para um conhecimento prévio da área em que esteja sendo estudada a implantação de uma

obra linear e possibilita uma melhor atuação no planejamento de custos diretos (construção) e indiretos (p. e. compensações ambientais e desapropriações).

Este conhecimento prévio da área, também chamado de diagnóstico zero por Guimarães *et al.* (2007), é utilizado para compreender a problemática da área possibilitando fornecer subsídios científicos ao uso e manejo adequado do terreno, mediante levantamento de estudos já existentes do mesmo.

Esses estudos vão facilitar o preenchimento da base de dados e a geração de informações que servirão de subsídio para futuras análises de alternativas de traçado e das ferramentas que serão utilizadas para tal, além de estabelecer prioridades de planos de ação ao longo do projeto, assim como diretrizes de campo e marcos contratuais.

Outro exemplo da importância de estudos geológico-geotécnico para determinação de traçados de obras lineares é ilustrado por Kochen (2006) ao citar o gasoduto Bolívia-Brasil construído pela Petrobrás com extensão de 2.500 km em solo brasileiro atravessando cinco estados (MS, SP, PR, SC e RS), cerca de cinco regiões geológico-geotécnicas e relevo totalmente diferentes, desde áreas planas e alagadas, como no Pantanal até regiões montanhosas como no estado do Paraná.

Portanto, é pertinente o planejamento e estruturação de dados, assim como um estudo prévio da área a qual será alvo de estudos de uma obra linear. Estudos e avaliações para alternativas de rota mostram-se fundamentais para a redução de custos ao longo do projeto e minimizam ações remediadoras. As ferramentas de SIG vêm se mostrando cada vez mais adequadas às análises espaciais e auxílio às tomadas de decisões para determinação de traçados assim como de aquisição, armazenamento, manuseio e geração de dados e informações para estudos científicos.

1.2 Metodologia geral

A Ferrous Resources do Brasil S/A desenvolve estudos de suporte a engenharia básica para implantação do mineroduto o qual se inicia em Congonhas (MG), onde se localiza sua mina de VIGA, e termina em Presidente Kennedy (ES), onde se projeta seu porto para embarque do minério, além de passar no território de algumas cidades do estado do Rio de Janeiro, e transportará 25 milhões de toneladas de minério de ferro já beneficiado na mina em Congonhas.

Na atual fase, o trecho inicial de Brumadinho a Congonhas (aproximadamente 60 km) foi desconsiderado por motivos de projeto. Portanto, esses estudos ainda possuem algumas alternativas pontuais para validação de um melhor traçado. Para os estudos iniciais de implantação, foram abordados aspectos geológico-geotécnicos, geomorfológicos além da análise preliminar de sua rota.

Considerou-se para esta análise preliminar os resultados da fotointerpretação, vetorização de dados, mapa de declividade, delimitação de micro bacias, dados de empresas terceirizadas, além da avaliação de normas ambientais.

Todas as informações adquiridas foram compiladas em uma base de dados geográfica para que pudesse ser manipulada e analisada em um ambiente computacional. A tecnologia de SIG como ferramenta permite uma abordagem inicial e subsídio para compreender melhor o terreno, as formas e os processos que o desenharam de forma remota, porém, confiável.

A idéia de gerar uma base de dados estruturada é que ela poderá juntar e relacionar todas as informações disponíveis, associando os dados e gerando uma base de dados espacial com informações consistentes. Essa base de dados espacial propiciará uma melhor utilização das informações e possibilitará análise e tempo de processamento mais rápido.

Ao longo deste trabalho será visto como será gerada uma superfície de custo ponderado e o uso de função de distância de custo acumulado para a geração do modelo espacial de melhor traçado para o mineroduto da Ferrous Resources do Brasil S/A.

1.3 Objetivos e Justificativa

A Ferrous Resources do Brasil S/A por meio de análises preliminares e algumas premissas de projeto tais como custo de furos direcionais entre outros, moldaram um traçado preliminar para o mineroduto Viga-Presidente Kennedy.

Esse traçado preliminar foi validado ao longo do tempo do projeto de viabilidade e busca minimizar custos diversos como compra de terras e indenizações com superficiários, investigações de campo adicionais e trabalhos geotécnicos.

O uso de SIG, como ferramenta para análises de decisão multicritério, possibilita o estudo de caminho de menor custo, por meio de funcionalidades específicas que utilizam as superfícies de distância ponderada para determinar uma rota de melhor custo-benefício entre uma origem e um destino.

Este tipo de abordagem propicia um ganho de tempo e custo, uma vez que realiza uma análise sobre uma determinada escala de trabalho deixando o refinamento do traçado e outros detalhes de projeto para serem validados em campo ou em etapas posteriores, determinando diretrizes e ações a serem tomadas.

O objetivo deste trabalho é estudar e comparar melhores alternativas de traçado para um mineroduto, utilizando o exemplo do projeto da Ferrous Resources do Brasil S/A, por meio de ferramentas de análise e funções de distância que permitem determinar a localização mais próxima ou a de menor custo de caminho para um destino específico utilizando a ferramenta de análise do software ArcGIS *Least Cost Path* para buscar um traçado preliminar alternativo e compará-lo como traçado já desenhado pela empresa a fim de (1) auxiliar nas tomadas de decisões, (2) escolher um melhor traçado para o mineroduto por meio dessa ferramenta e (3) comparar os possíveis traçados com a realidade da área diretamente afetada pelo empreendimento.

1.4 Estrutura da tese

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo são apresentados alguns exemplos de obras lineares e suas integrações com os SIG, uma metodologia geral do trabalho, além das justificativas e os objetivos.

No segundo capítulo é apresentada a área de estudo, suas características geomorfológicas e as formas de relevo, a localização do empreendimento e conceitos importantes relacionados com os principais tópicos envolvidos no estudo de melhor traçado.

No terceiro capítulo é apresentada a metodologia do trabalho e os passos tomados para adquirir os dados necessários ao projeto. Descreve-se cada etapa do desenvolvimento do trabalho como fotointerpretação, a vetorização dos dados, a delimitação de micro bacias, geração de mapa de declividade e dados adquiridos da própria Ferrous Resources do Brasil S/A como os dados provenientes de restituição de imagens.

No capítulo quatro os dados são reclassificados e preparados para a utilização da ferramenta de análise do software ArcGIS *Least Cost Path*. É criada uma base de dados espacial para armazenar, manipular e criar informações que serão complementares aos dados já existentes, além de estipular regras de topologia e domínios da base de dados.

Nesse capítulo, os dados são organizados e preparados para realizar análises de caminho de menor custo por meio de funcionalidades específicas que utilizam as superfícies de

distância ponderada e direção em uma área para determinar uma rota de custo-benefício entre uma origem e um destino.

São ilustrados os resultados após a utilização da função de caminho de menor custo. Foram realizados alguns refinamentos no traçado e comparado com alternativas já existentes. Nesse capítulo também se ilustra a capacidade do software de auxílio às tomadas de decisão.

No quinto e último capítulo apresenta-se uma avaliação crítica final ao concluir o trabalho enfatizando a importância e eficácia do uso de ferramenta SIG para a escolha ou análise do melhor traçado.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1 Introdução

Neste capítulo é definida a área de estudo para os trabalhos de melhor traçado para o mineroduto além de fazer a descrição de suas características geomorfológicas e as formas de relevo.

2.2 Localização

O mineroduto da Ferrous Resources do Brasil S/A possui uma extensão aproximada de 400 km e atravessa três estados da região Sudeste. Tem seu início na região da Zona da Mata mineira, no município de Congonhas, e termina no município de Presidente Kennedy, no litoral sul do Espírito Santo, passando pelo extremo norte do estado do Rio de Janeiro nos municípios de Laje do Muriaé, Itaperuna, Natividade e Bom Jesus do Itabapoana (Figura 2.1).

Apesar das áreas antropizadas, o mineroduto percorre, nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro, regiões remanescentes de florestas estacionais semidecíduas e florestas tropicais pluviais chegando até o litoral do Espírito Santo, onde sofre influência marinha e flúvio-marinha.

A descrição feita no Relatório de Impactos Ambientais (RIMA), elaborado para o mineroduto da Ferrous, informa que as áreas nas quais o mineroduto atravessará caracterizam-se por uma grande variedade de rochas de diferentes origens que passaram por diversas transformações ao longo de milhões de anos. As movimentações e transformações das rochas levaram à formação dos mais diversos tipos de solos e relevos.

O mesmo documento relata que o relevo que se vê hoje é composto em parte pelos solos sobre rochas e em parte pelas rochas aparentes. Ao longo do mineroduto, o relevo varia de suave a ondulado, existindo também algumas encostas muito inclinadas, como as da Serra da Mantiqueira.

A seguir são apresentadas, com maior detalhe, as características e descrições dos domínios geomorfológicos e as formas de relevo das áreas por onde se projeta o mineroduto.

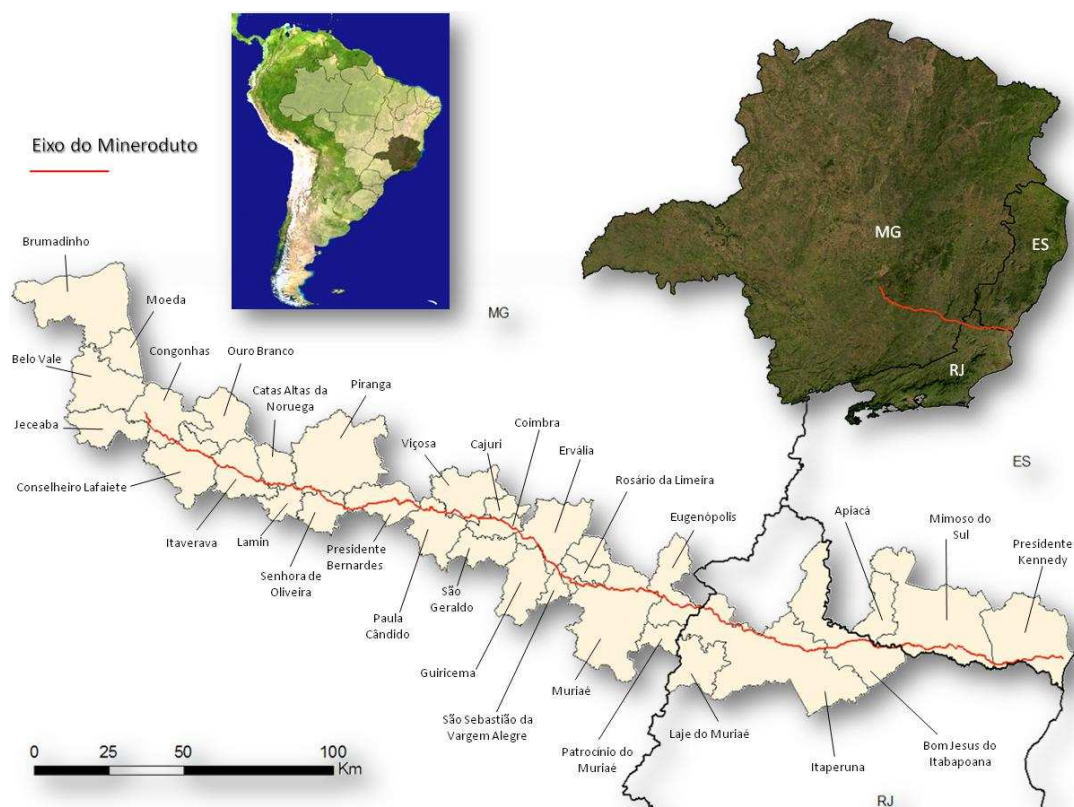


Figura 2.1- Mapa de localização.

2.3 Domínios Geomorfológicos

O traçado do mineroduto da Ferrous está inserido em um modelado predominantemente de dissecação fluvial, o qual é constituído por morros com formas de topos convexas, por elevada densidade de canais de drenagem e vales profundos (ROSS, 2000).

Em algumas regiões também é apresentado um modelado de acumulação fluvial, o que indica áreas sujeitas a inundações periódicas, correspondentes às várzeas atuais; e um modelado de acumulação de terraço fluvial, as quais representam regiões levemente inclinadas, apresentando algumas vezes ruptura de declive em relação ao leito do rio.

Ao longo do eixo do mineroduto podem ser identificados três grandes domínios geomorfológicos, os quais foram divididos de seguinte forma e estão ilustrados na Figura 2.2.

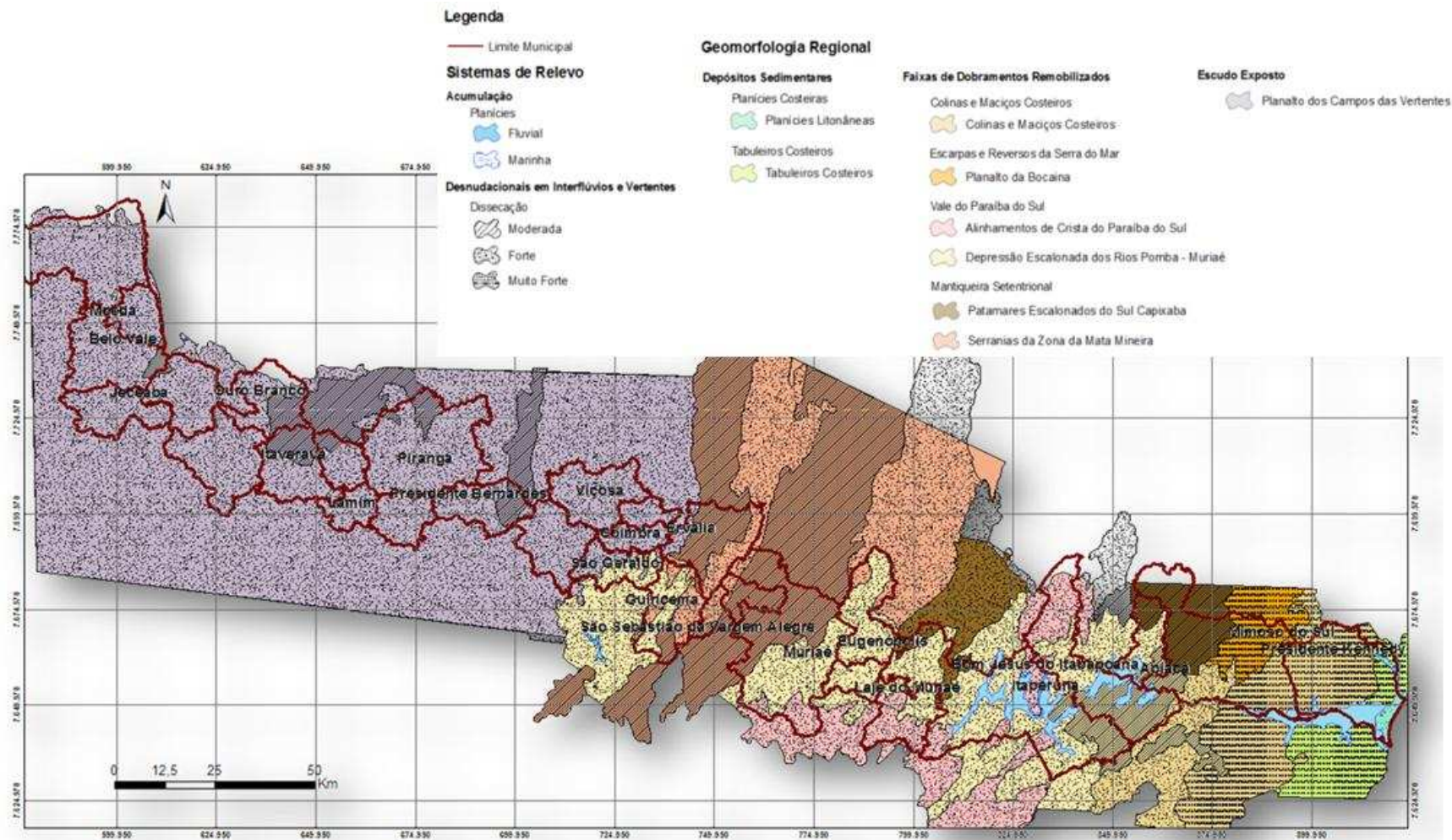


Figura 2.2 - Mapa de Domínios Geomorfológicos e Forma de Relevô. (Modificado do PROJETO RADAMBRASIL - 1983)

- Região de Escudo Exposto: Compreende as regiões de planalto e algumas partes do quadrilátero ferrífero.
- Faixas de Dobramento Remobilizado subdividida em:
 - *Serranias da Zona da Mata Mineira*
 - *Depressão Escalonada dos Rios Pomba - Muriaé intercalado com Alinhamentos de Cristas do Paraíba do Sul.*
- Depósitos Sedimentares: Regiões que compreendem as planícies e os tabuleiros costeiros.

2.3.1 Região de Escudo Exposto

A primeira parte do traçado contempla uma região de Escudo Exposto caracterizado pelo Planalto de Campos das Vertentes. Essa feição vai de Brumadinho até os municípios de Paula Cândido e Coimbra.

De acordo com PROJETO RADAMBRASIL (1983) a denominação Escudo Exposto deve-se às suas características morfoestruturais de estabilidade com exposição de rochas cristalinas.

Esta unidade geomorfológica configura um elevado compartimento planáltico intensamente dissecado em formas mamelonares e cristas, resultando uma paisagem característica do tipo “mares de morros”. As altimetrias vão de 400 a 1.300 m e a unidade destaca-se como importante divisor de quatro bacias hidrográficas - rios Doce, São Francisco, Paraná e Paraíba do Sul.

Na unidade, de inserção do mineroduto, são observadas feições de dissecação homogêneas que apresentam vertentes retilinizadas e entalhadas por ravinas. Acima do nível de colinas de topo convexizados destacam-se elevações tipo cristas das quais partem vertentes irregulares e ravinadas.

Nas proximidades do município de Viçosa, o relevo assume formas alongadas com os topos subaguçados e um nível embutido de colinas. As encostas situam-se entre convexas e retilinizadas com ravinamentos.

2.3.2 Faixas de Dobramento Remobilizado

Esta unidade tem como característica principal os conjuntos de falhamentos de grande extensão, blocos deslocados, escarpas e relevos alinhados coincidindo com os dobramentos

originais e/ou falhamentos mais recentes. Este domínio geomorfológico pode ser dividido em duas grandes unidades, a saber:

2.3.3 Serranias da Zona da Mata Mineira

Constitui-se de relevos de formas alongadas, tipo cristas e linhas de cumeada, que ocorrem principalmente na parte leste de Minas Gerais. Os tipos de modelados mais comuns referem-se à dissecação diferencial, com predominância de índices de aprofundamento situados entre 268 e 344 m.

A unidade é marcada por escarpas adaptadas a falhas, sulcos estruturais, grandes linhas de cumeadas e cristas simétricas alinhadas, as quais indicam a direção dos dobramentos e falhamentos ocorridos na área.

Esta unidade está presente na região dos municípios de Ervália, Rosário da Limeira, São Sebastião da Vargem Alegre, parte leste do município de Guiricema e a porção norte e noroeste do município de Muriaé.

2.3.4 Depressão Escalonada dos Rios Pomba - Muriaé intercalado com Alinhamentos de Cristas do Paraíba do Sul

Na Depressão Escalonada dos Rios Pomba - Muriaé desenvolve-se uma depressão embutida de caráter remontante, ao longo dos vales desses dois eixos principais. Os processos de dissecação interceptaram cristas e linhas de cumeadas, atuando em pelo menos três níveis altimétricos que podem estar relacionados a períodos de erosão mais intensa ou mesmo a reajustamentos na crosta.

Esta unidade ocorre no extremo leste de Muriaé, no município de Eugenópolis, Patrocínio do Muriaé, Laje do Muriaé, Itaperuna, Bom Jesus do Itabapoana e Apiacá. Contudo sofre intercalações com o domínio dos Alinhamentos de Cristas do Paraíba do Sul.

Esse último corresponde ao setor médio da bacia do rio Paraíba do Sul, cujas feições refletem o alto controle geológico disposto em um conjunto de falhas e fraturas com orientação NE-SO.

O quadro morfológico reflete fortemente a estrutura e os litotipos locais, com colinas orientadas e/ou aplanadas. À frente desses modelados, ocorrem colinas convexo-côncavas de aprofundamentos variáveis.

Essas intercalações estão presentes nos municípios de Laje do Muriaé, Itaperuna e Bom Jesus do Itabapoana.

2.3.5 Depósitos Sedimentares

Por fim, a parte situada nos municípios de Mimoso do Sul e Presidente Kennedy, ambos no estado do Espírito Santo, está localizada em uma região de planícies costeiras e depósitos sedimentares.

De acordo com as diversidades de combinações morfoestruturais e morfoclimáticas, destacam-se duas regiões neste domínio: as Planícies Costeiras e os Tabuleiros Costeiros. Essas regiões encerram aspectos fisiográficos que condicionam ambientes genéticos e modelados de acumulação e de dissecação das unidades que as compõem.

Essas unidades incluem aluviões compostos por areias, cascalhos, argilas inconsolidadas e sedimentos marinhos, constituindo dunas, restingas, cordões litorâneos, planícies e terraços marinhos, fluviomarinhos, e fluviais.

2.4 Formas de Relevo

Predomina na região de inserção do empreendimento o sistema de relevo “dissecação fraca” que abrange relevos colinosos com vertentes convexas e topos tabulares, intercalados por alvéolos e declives que variam de 5° a 24°. Os processos erosivos ocorrem de maneira generalizada, sobretudo, em áreas de colinas de encostas com maior declividade. As cotas altimétricas variam aproximadamente de 680 a 1.620 metros.

Em áreas de terrenos dos municípios de Moeda, Visconde do Rio Branco, Laje do Muriaé e Bom Jesus do Norte, ocorre um conjunto de serras alongadas, como as serras da Moeda e da Mantiqueira, e declives das encostas entre 11° a 24°. As altitudes variam entorno de 900 a 1.700 metros. Nessas áreas são identificados processos morfogenéticos intensos como escoamentos difusos e concentrados. São observados movimentos de massa como rastejo e deslizamentos nas encostas, principalmente, em decorrência da retirada da vegetação e uso inadequado do solo (pastagens).

O empreendimento, também, está inserido em relevos de dissecação estrutural, orientados, constituindo cristas assimétricas e escarpas que coalescem com rampas de colúvio, e colinas convexas, com declives entre 11° a 24°. As altitudes variam em torno de 870 a 1.155 metros. Esse tipo de relevo destaca-se em terreno dos municípios de Conselheiro Lafaiete, Muriaé, Itaperuna e Bom Jesus do Itabapoana. É caracterizado por

processos de desagregação mecânica a processos superficiais de escoamento difuso e concentrado. São evidenciados processos erosivos como ravinas, sulcos e voçorocas, resultante, sobretudo, da intensa utilização das encostas (pastagens).

Na área correspondente ao município de Presidente Kennedy, no extremo sul do estado do Espírito Santo, ocorre um relevo colinoso com vertentes longas de declive menor que 8°. Nas áreas próximas ao litoral, destacam-se baixas colinas com vales largos e de fundos chatos, onde a intervenção antrópica é mais evidente, resultando em processos erosivos como sulcos e ravinas.

As informações geomorfológicas e de relevo foram retiradas das folhas SF23 e SF24 Rio de Janeiro/Vitória do PROJETO RADAMBRASIL da série de Levantamento de Recursos Naturais - 1983.

2.5 Conclusão

Conclui-se neste capítulo que, de fato, o traçado por onde passa o mineroduto apresentado pela Ferrous Resources do Brasil S/A possuem características diversificadas e particulares. Isso requer um conhecimento mais detalhado de tais características para que a intervenção antrópica ao instalar o mineroduto não desencadeie processos do meio físico e de impactos ambientais nem ameace a integridade do empreendimento com, por exemplo, a instabilidade de taludes.

Aproximadamente, dois terços do trecho onde será instalado o mineroduto o relevo, segundo Fonseca (2006), é constituído por elementos que não podem ser entendidos isoladamente, mas sim dentro de uma interação dinâmica e em cadeia com os demais elementos constituintes do meio físico, determinando a conformação do relevo atual, ao passo que a interação atual entre estes fatores condiciona o funcionamento do relevo.

Porto (2006) ressalta que entender os processos endógenos e exógenos que controlam o desenvolvimento de regolitos em escala local, regional e até continental é de fundamental importância para estudos ambientais. E que é importante observar a influência da ação antrópica, pois essa pode acelerar ou redirecionar os processos naturais.

Portanto, é sempre recomendável que seja elaborado um plano de investigação e ensaios para se conhecer as características geotécnicas dos diversos tipos de solo que são atravessados pelo mineroduto, pois para cada situação há uma forma de ação corretiva e

de métodos a serem empregados para garantir a estabilidade do material ao se implantar o mineroduto.

3. DADOS E MÉTODOS

3.1 Introdução

Este capítulo descreve a metodologia e as etapas de trabalho para a formatação da base de dados e posteriormente as análises para a escolha da melhor alternativa de traçado do mineroduto da Ferrous Resources do Brasil S/A.

3.2 Dados

3.2.1 Dados de base

Importante mencionar que parte dos dados utilizados foi cedida pela Ferrous Resources do Brasil S/A, portanto, buscou-se manipular essas informações ao invés de buscá-las de outra forma, como em *websites* de órgãos públicos ou entidades especializadas.

Esses dados, como o caso da faixa de topografia e drenagens, foram delimitados em uma área com extensão de 2,5Km para cada lado do traçado preliminar a qual foi chamada de *buffer* limítrofe da área de estudo. Os dados utilizados neste trabalho são apresentados conforme tabela 3.1 abaixo:

Dados		Descrição dos Dados
Dados fornecidos pela FERROUS	Fotografias aéreas	Pares estereoscópicos de fotografias aéreas ao longo do eixo preliminar. Foram 18 faixas de vôo na escala 1:30.000
	Restituição de levantamento a laser	Levantamento a laser aerotransportado. A restituição forneceu a representação da topografia, lagos, drenagem, edificações e áreas urbanas dentro de um limite.
	Traçado preliminar	Alternativa de eixo a partir dos dados de restituição.
	Área de influência	<i>Buffer</i> com espaçamento de 2,5km a partir do traçado preliminar contendo os dados da restituição.
Dados de órgãos públicos	Demais dados	Nascentes, APPs, RPPN, Drenagem, edificação em geral, requerimento e concessão de lavra e formação de unidades de conservação.

Tabela 3.1 - Tabela de Dados

A abordagem metodológica utilizada permitiu a sistematização da entrada de dados no modelo, assim como a hierarquização dos mesmos conforme sua importância (pesos/custos). A forma com que os dados citados na tabela acima foram adquiridos, manipulados e vetorizados é detalhada a seguir.

3.2.2 Fotointerpretação

A sistemática da fotointerpretação para estudos de implantação de dutos foi inicialmente desenvolvida por Guy (1966) e adaptada para as condições brasileiras por Riverau (1972) e Soares e Fiori (1976).

Rodrigues *et al.* (2005) desenvolveram estudos no “eixo controlador” do duto petrolífero de Mangaratiba, no Rio de Janeiro, e elaboraram mapas geotécnicos para auxiliar no planejamento urbano, territorial e ambiental. A base desses estudos foi a interpretação de fotografias aéreas na escala de 1:8.000 na faixa do duto complementada por informações obtidas em sobrevoos e reconhecimento prévio de campo. Numa segunda fase foram mapeadas e classificadas em campo as feições de risco geológico-geotécnico, as quais foram posteriormente tratadas e analisadas.

Souza e Fiori (2007) estabeleceram uma metodologia específica de fotointerpretação para zoneamento geotécnico em eixos de dutos terrestres, ou seja, delimitação de feições do terreno que apresentam comportamentos e parâmetros geotécnicos diferenciados em relação aos solos, rochas e relevo frente aos processos de desestabilização do terreno e capacidade de suporte da área que sustenta o empreendimento.

Para a realização desse trabalho, a Ferrous disponibilizou 420 fotografias aéreas na escala de 1:30.000 (pares estereográficos) as quais foram geradas em 18 faixas de vôo. Como dito anteriormente, essas fotografias abrangiam completamente o primeiro traçado sugerido pela empresa e foram interpretadas englobando uma faixa de segurança de 2.500 metros para cada lado desse primeiro traçado (*buffer*).

A Ferrous disponibilizou também um conjunto de dados em meio digital denominado de restituição que são compostos por um levantamento topográfico da área, um conjunto de dados sobre a malha viária e ferroviária, cidades, hidrografia, etc. Esses dados completam os dados relativos a empresas terceirizadas e foram enquadrados dentro do *buffer* e se encontram referenciadas na projeção Universal Transversa de Mercator no datum SAD 69 (*South American Datum*, 1969) para as zonas 23K e 24K.

Também foram disponibilizadas ortofotos as quais serviram para identificar as feições no processo de fotointerpretação.

Para a realização da fotointerpretação gerou-se uma moldura que enquadrava o trecho a ser interpretado. Essa moldura foi sobreposta a um mosaico, que são as fotografias aéreas dispostas na faixa de vôo, e a partir disso, escolhidas as fotos (pares estereográficos) que recobriam o trecho solicitado na extensão completa do *buffer*.

Após essa escolha foram gerados *layouts* do enquadramento dessas fotografias na escala 1:30.000 contendo a rede de drenagem, o traçado do duto e os limites do *buffer*. Essas feições foram impressas em lâminas transparentes e fixadas corretamente nas fotografias aéreas com a ajuda de pontos notáveis. Após esses passos, efetuou-se a fotointerpretação, a qual é a interpretação propriamente dita com o auxílio de estereoscópios de espelhos.

As feições identificadas que compuseram os estudos de fotointerpretação são apresentadas na tabela 3.2 seguir:

Tipo de feição	Feições	Descrição
Feições relativas a processos do meio físico Feições relativas a processos do meio físico	Depósito de pé de encosta	Possíveis ocorrências em encostas com alta declividade, micro bacias hidrográficas (anfiteatros) com fluxo concentrado, depósitos de encostas e de sopé de encostas (depósitos de tálus), cicatrizes de escorregamento antigas ou recentes, dentre outros.
	Áreas alagadas ou alagáveis	Planícies de inundação e áreas diversas sujeitas a alagamentos, tais como várzeas, baixadas, depressões, etc.
	Áreas Erosivas	Identificação de focos erosivos ou áreas susceptíveis à erosão.
	Zonas sujeitas a recalque por adensamento	Identificação de áreas com presença de terraços, leques aluviais e solos moles (orgânicos e arenosos), as quais são identificadas neste trabalho como áreas alagadas ou alagáveis e eventualmente como erosão.
Feições geológico- estruturais	Afloramentos de rocha	Maciços expostos, evidenciados por áreas de matacão e encostas nuas.

Tabela 3.2—Feições identificadas na fotointerpretação

As Figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 ilustram, respectivamente, as regiões de depósito de pé de encosta, áreas alagadas ou alagáveis, áreas erosivas e afloramentos de rocha.

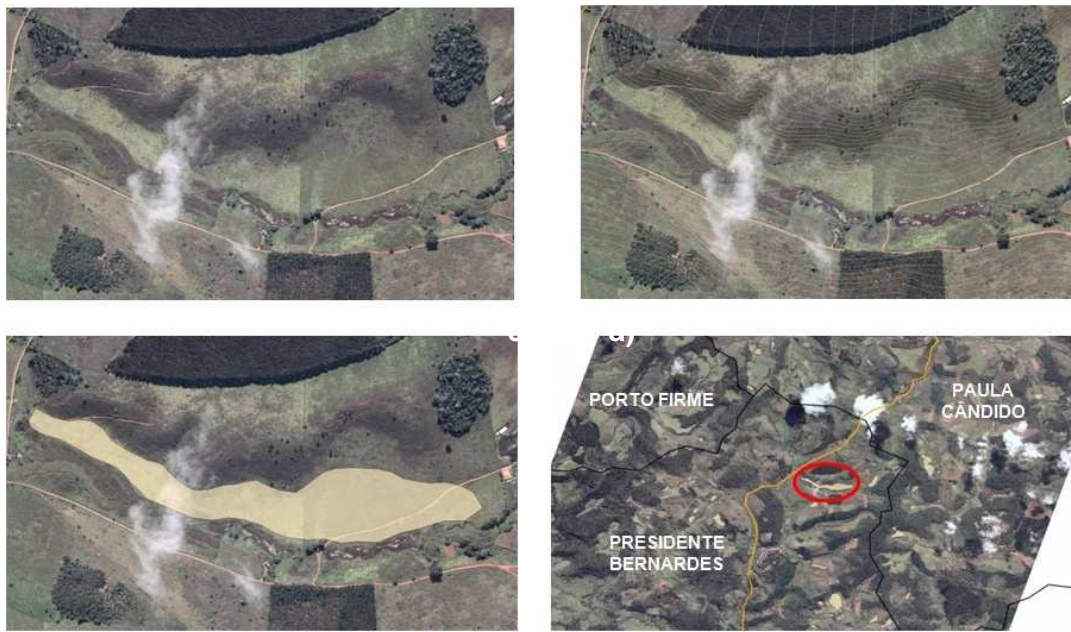


Figura 3.1 – Detalhe de depósito de pé de encosta identificado nas fotografias aéreas. - linha amarela indicativa do mineroduto preliminar.

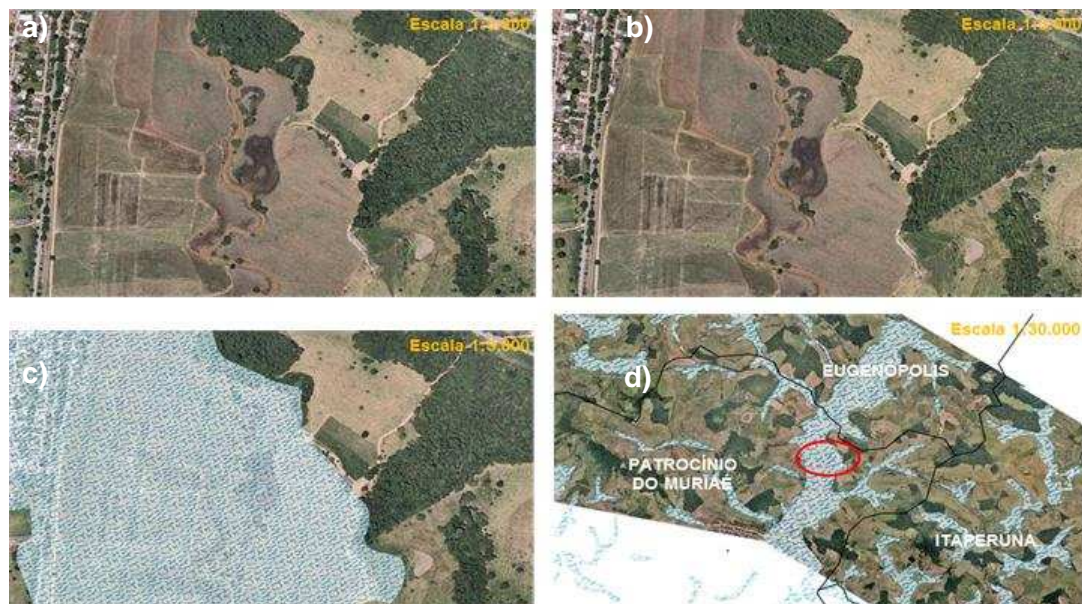


Figura 3.2 – Detalhe de áreas alagadas ou alagáveis identificadas nas fotografias aéreas. a) visualização da feição na ortofoto, b) curvas de nível como auxílio para identificação da feição, c) feição identificada e vetorizada e d) feição vista na escala de trabalho - linhas pretas indicativas de limites de municípios.



Figura 3.3 – Detalhe da erosão identificada nas fotografias aéreas. a) visualização de erosão na ortofoto, b) erosão com as curvas de nível, c) vetorização e delimitação da feição na ortofoto e d) feição vista na escala de trabalho.

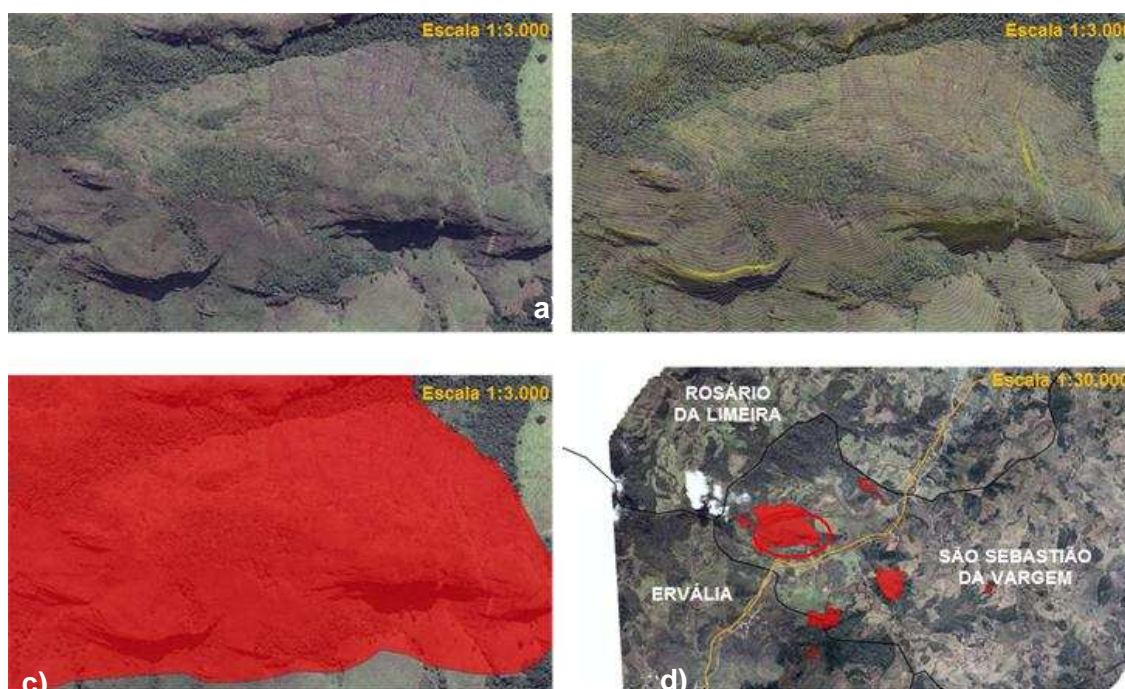


Figura 3.4 – Detalhe do afloramento de rocha identificado nas fotografias aéreas. a) visualização do afloramento de rocha na ortofoto, b) curvas de nível como auxílio para identificação da feição, c) afloramento identificado e vetorizado e d) feição vista na escala de trabalho.

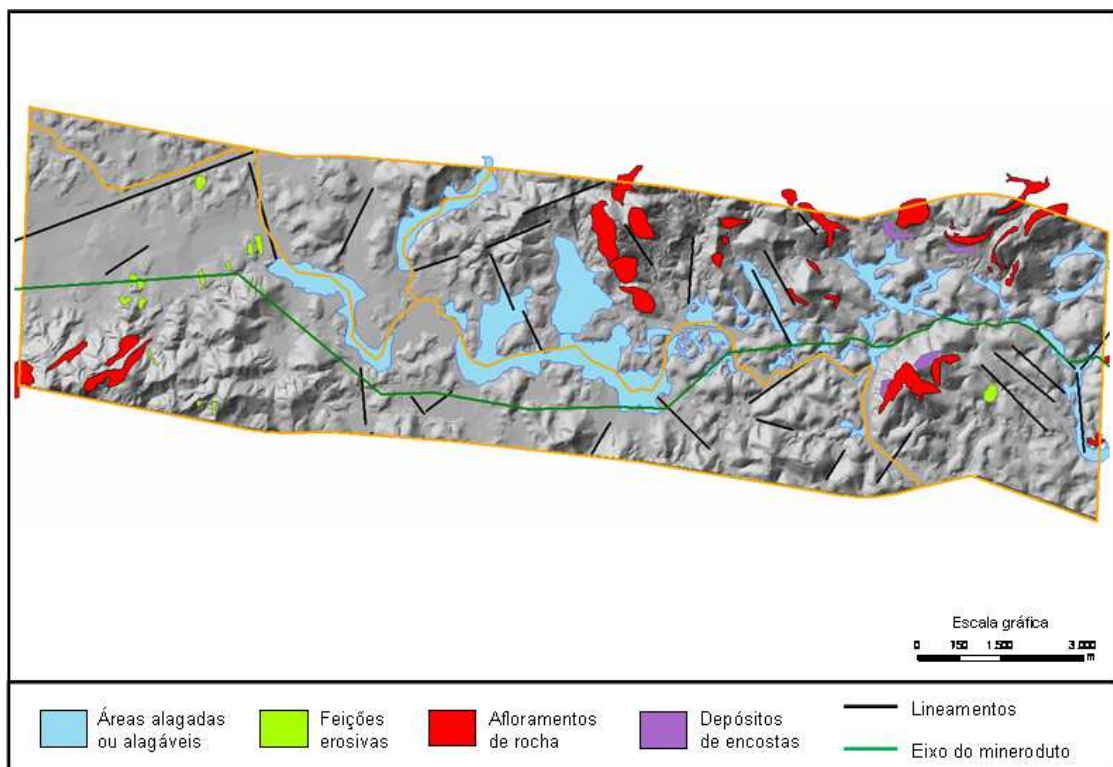
3.2.3 Vetorização e Segmentação de Imagens

O processo de vetorização possibilitou o armazenamento e manipulação dos dados adquiridos na fotointerpretação na base de dados espacial.

A vetorização é o processo no qual são registradas as feições identificadas na fotointerpretação e definindo-as geograficamente no ambiente computacional. Conforme Casanova *et al.* (2005) a vetorização é o processo de transformar os conceitos abstratos de espaço geográfico no espaço computacionalmente representado.

Para a aquisição de dados foram elaborados *overlays* impressos com o traçado do duto, a faixa lateral considerada (*buffer*) e a rede hidrográfica. As feições ou atributos identificados foram demarcados nos *overlays* e esses digitalizados (por meio de *scanners*) para que fosse iniciada a vetorização.

Os dados vetorizados estão ilustrados na Figura 3.5. As feições identificadas são: áreas alagadas ou alagáveis, afloramentos de rocha, feições erosivas, depósitos de pé de encosta e lineamentos.



Apesar do processo de vetorização ser um procedimento relativamente simples, envolve a aplicação de conceitos importantes para a determinação da qualidade do trabalho e dos resultados apresentados, conforme cada feição é representada no modelo espacial.

Casanova *et al.* (2005) explica que o sucesso de qualquer implementação em computador de um sistema de informação é dependente da qualidade da transposição de entidades do mundo real e suas interações para um banco de dados informatizado.

Fotheringham e Wegner (2000) afirmam que um modelo é a representação simplificada de um objeto de investigação para um propósito de descrição, explicação, previsão e planejamento. Entretanto, a descrição e a explicação de um lugar, assim como a previsão (por exemplo, fenômenos atmosféricos) e planejamento de atividades não podem ocorrer sem qualidade de informação.

A importância da qualidade dos dados geo-espaciais é que esses afetam diretamente as tomadas de decisões. Kumar (2003) afirma que a baixa qualidade de dados geo-espaciais pode causar sérias consequências e que quanto mais pobre for o dado, mais pobre será a decisão tomada a partir dele.

Desta forma, os dados referentes às áreas verdes ao longo da área do *buffer* foram adquiridos através do processo de segmentação de imagens, uma vez que proporcionam melhor acurácia na representação da feição geográfica. Para essa análise foram utilizadas as ortofotos cedidas pela Ferrous.

Devido ao tamanho das ortofotos, estas sofreram uma alteração em suas resoluções. Cada ortofoto possuía as células de sua matriz com dimensões de 1x1. Após a alteração de resolução, passaram a ter uma dimensão de 10x10. Esse procedimento causou um efeito de generalização na imagem e foi estabelecido para melhor desempenho de processamento.

Kumar (2003) enfatiza que a generalização inclui a eliminação e a fusão de entidades, redução de detalhes, suavização, desbaste e agregação de classes. Portanto, tomou-se o cuidado de se avaliar o quanto de informação poderia ter sido perdida devido à alteração de resolução de cada ortofoto. Foi feita a comparação das imagens e não foi apresentada perda de informação conforme pode ser visto na Figura 3.6.



Figura 3.6– Exemplo de imagem após diminuição de resolução. a) ortofoto original. b) mesma ortofoto com a resolução espacial modificada.

O mesmo autor salienta que a resolução da base de dados deve corresponder ao nível de detalhe requerido pelo trabalho. Dessa maneira, o nível de detalhe apresentado por cada ortofoto modificada atendia satisfatoriamente os objetivos desse relatório, uma vez que a identificação das áreas verdes não foi comprometida.

O processo de segmentação de imagens constitui-se em uma análise de *pixels* de forma isolada. Divide-se a imagem em regiões que devem corresponder às áreas de interesse da aplicação. Entende-se por regiões um conjunto de *pixels* contínuos, que se espalham bidirecionalmente e que apresentam uniformidade (LOPES, 2005).

O uso dessa técnica baseada em classificar objeto composto por um conjunto de *pixels* com características similares se apresenta como uma alternativa aos métodos convencionais (a vetorização de polígonos pelo usuário). Os objetos resultantes da segmentação da imagem são o resultado do agrupamento de *pixels* por meio de crescimento de regiões apoiado em aspectos espectrais (ANTUNES e LIGNAU, 2005).

Para que o classificador possa segregar as feições geográficas em regiões, é necessário estipular um critério de similaridade e de área dos *pixels* das ortofotos.

O critério de similaridade baseia-se em um teste de hipótese estatístico que testa a média entre as regiões. A seguir, divide-se a imagem em um conjunto de sub-imagens e então se realiza a união entre elas, segundo um limiar de agregação definido (LOPES, 2005).

Para a união de duas regiões A e B vizinhas, deve-se adotar o seguinte critério:

- A e B são similares (teste das médias);
- a similaridade satisfaz o limiar estabelecido;

- A e B são mutuamente próximas (dentro os vizinhos de A, B é a mais próxima, e dentro os vizinhos de B, A é a mais próxima).

Caso as regiões A e B satisfaçam esses critérios, essas regiões são agregadas; caso contrário o sistema reinicia o processo de teste de agregação.

O processo de segmentação ilustrado na Figura 3.7 teve como similaridade e área do *pixel* os valores de 15 e 60 respectivamente. Valores de similaridade mais altos agrupavam em um mesmo segmento regiões espectralmente distintas, fazendo com que houvesse uma perda total ou parcial de algumas regiões de interesse. Valores menores detalhavam demasiadamente a imagem, excedendo a escala do trabalho.

Após a aplicação do critério de similaridade e de área, a imagem é segregada por regiões conforme a figura abaixo.

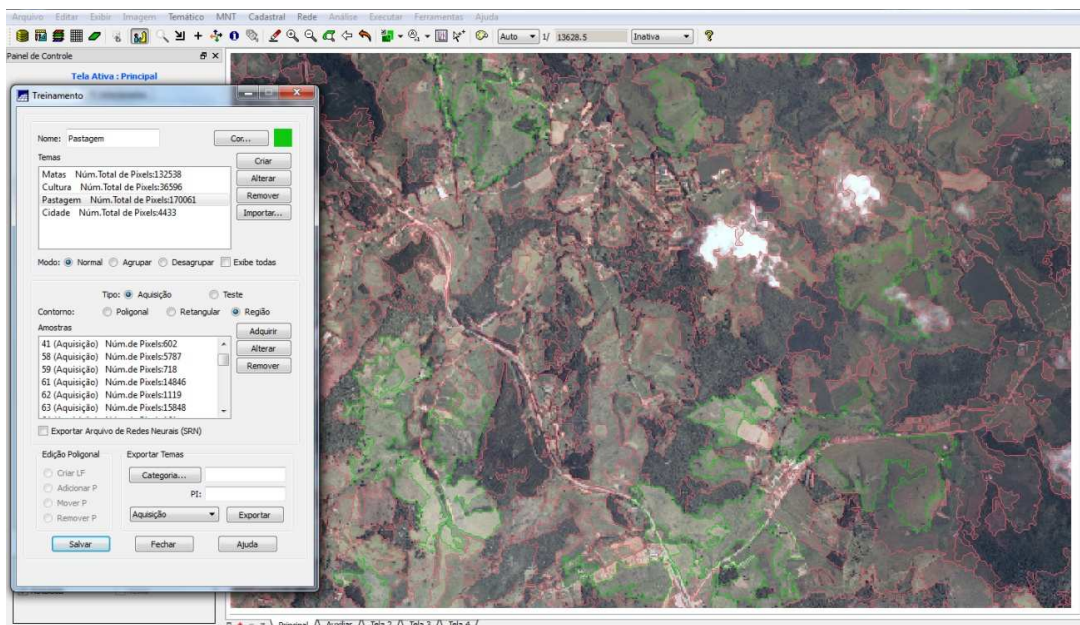


Figura 3.7 – Segmentação de imagem e início do processo de classificação.

Após o procedimento de segmentação, é necessária uma classificação da imagem que proporcionará a distinção das feições geográficas conforme os grupos de amostragem escolhidos. Esses grupos de amostragem, ou treinamento, foram identificados na imagem segmentada como matas, pastagem, rios e lagos, áreas urbanizadas, solo exposto e afloramento de rocha.

O método de classificação adotado foi o de crescimento de regiões. Essa técnica gera o agrupamento de dados, na qual somente as regiões espacialmente adjacentes podem ser agrupadas. Os classificadores por regiões utilizam, além de informação espectral de cada *pixel*, a informação espacial que envolve a relação entre os *pixels* e seus vizinhos.

Esses classificadores procuram simular o comportamento de um fotointérprete, ao reconhecer áreas homogêneas de imagens, baseados nas propriedades espectrais e espaciais da mesma. A informação de borda é utilizada inicialmente para separar regiões e as propriedades espaciais e espectrais irão unir áreas com mesma textura¹.

A Figura 3.8 ilustra a imagem após o processo de classificação.

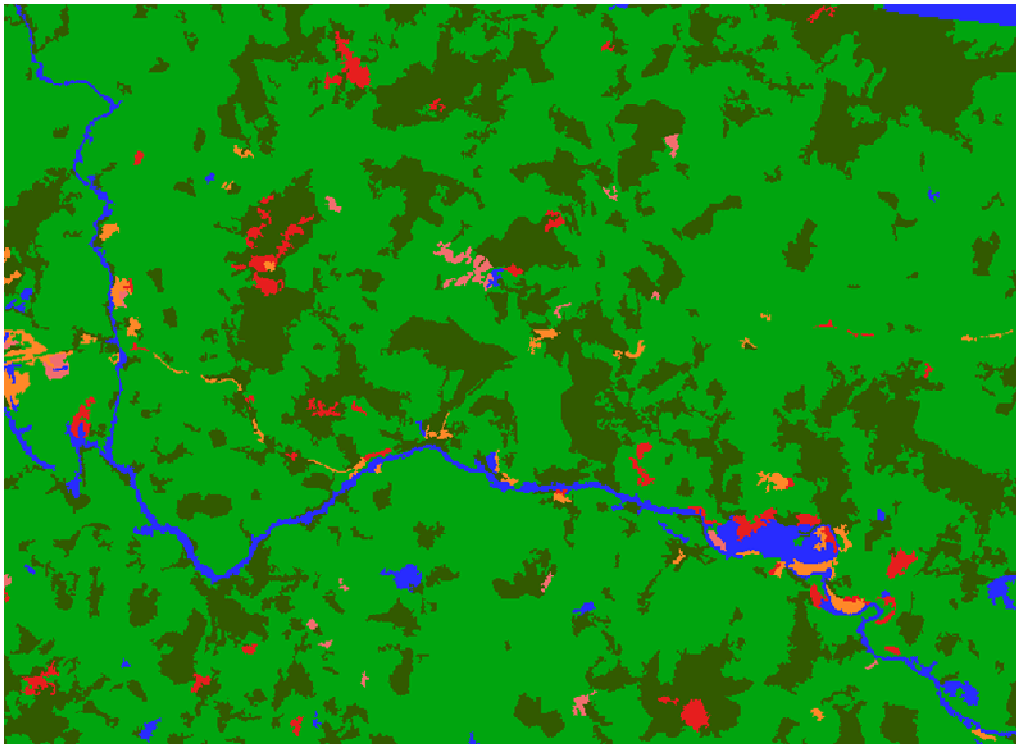


Figura 3.8 – Imagem classificada ilustrando matas (verde escuro), pastagem (verde claro), rios e lagos (azul), afloramento de rocha (vermelho), solo exposto (rosa claro) e áreas urbanizadas (laranja).

1 – Manual do SPRING – Tutorial de Geoprocessamento acessado no site <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html>, no dia 05/05/2011.

O passo seguinte foi a conferência e checagem da acurácia da informação gerada. A imagem foi reclassificada para que apresentasse apenas as informações referentes às matas. A nova imagem gerada foi sobreposta à ortofoto e o que se pode perceber é que o processo de classificação atingiu resultados satisfatórios. O resultado é ilustrado na Figura 3.9

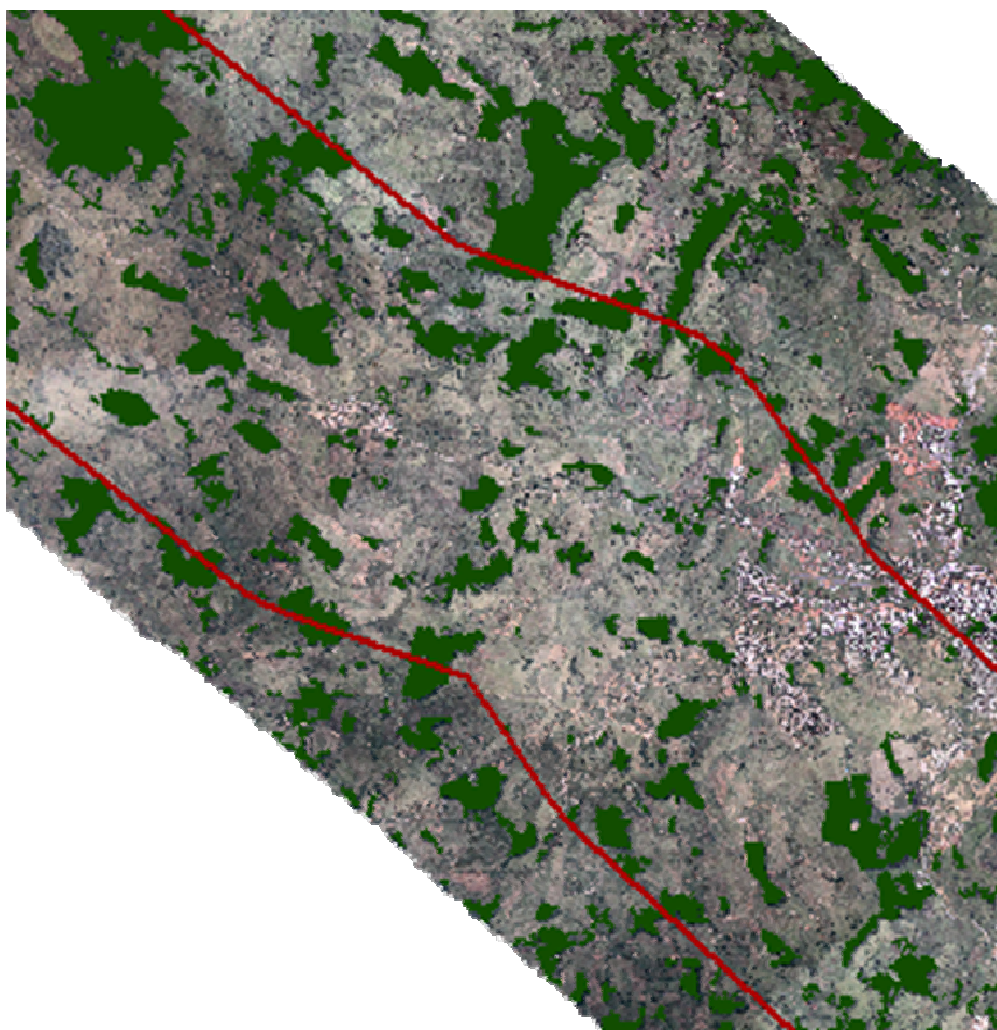


Figura 3.9 – Porção da imagem onde as áreas verdes são representadas após o processo de reclassificação.

3.2.4 Mapa de Declividade

A geração do mapa de declividade serviu de base para excluir áreas muito íngremes e, conseqüentemente, com maior custo de escavação e maior custo geotécnico, uma vez que grandes cortes levam a grandes taludes.

Os mapas de declividade foram elaborados com o formato *raster* ou matricial. Os modelos *raster* são excelentes para avaliar modelos ambientais tais como potencial erosivo do solo, cartas de uso e ocupação do solo, bacias hidrográficas, e etc. (Silva 2007).

O *raster* de declividade foi elaborado a partir de uma grade triangular ou TIN – *Triangulated Irregular Network* - e representa uma superfície gerada por um conjunto de faces triangulares. A grade triangular pode ser vista na Figura 3.10 classificada para ilustrar a hipsometria de parte da região.

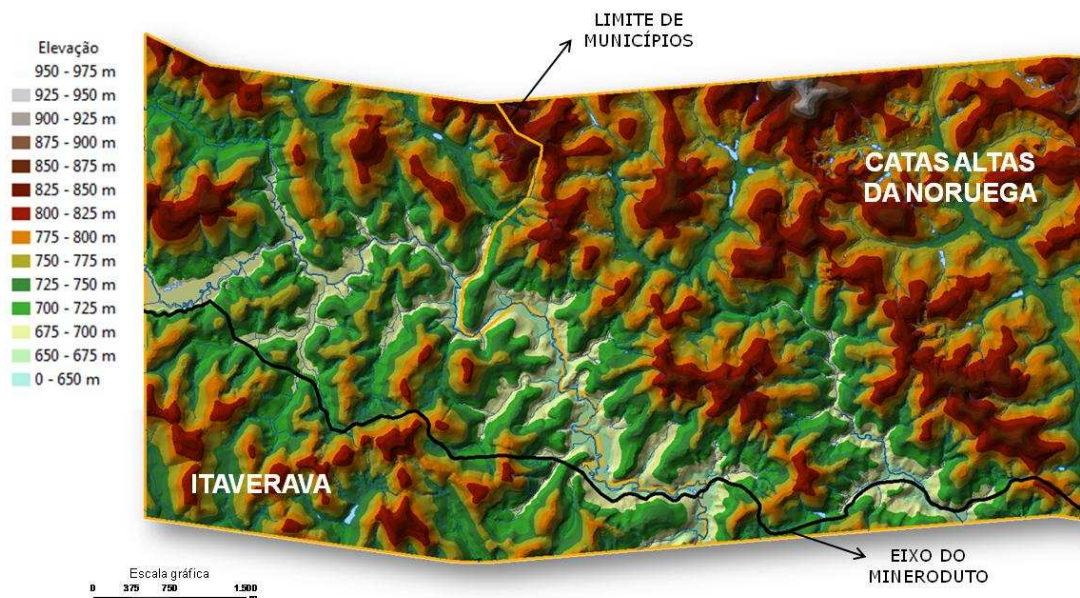


Figura 3.10 – Exemplo do mapa hipsométrico de uma porção do traçado do mineroduto.

Da mesma maneira, os dados de declividade respeitaram a separação das zonas 23 e 24 gerando-se 50 e 15 arquivos matriciais, respectivamente.

O sistema matricial tem substancialmente mais poder analítico do que o vetorial em análises de espaço contínuo e é mais adequado ao estudo de dados que variam continuamente sobre o espaço como solo e atributos geológicos (Silva, 2007).

Para a classificação do mapa de declividade foi obedecido o critério de 15% (9°) conforme especificação da Ferrous. Uma declividade superior a essa implicaria em possíveis problemas de funcionamento do mineroduto. Assim, a classificação dos dados de declividade foi de 0° a 10° (áreas correspondentes aos 15%), de 10° a 20°, de 20° a 30° e acima de 30° conforme ilustrado na Figura 3.11.

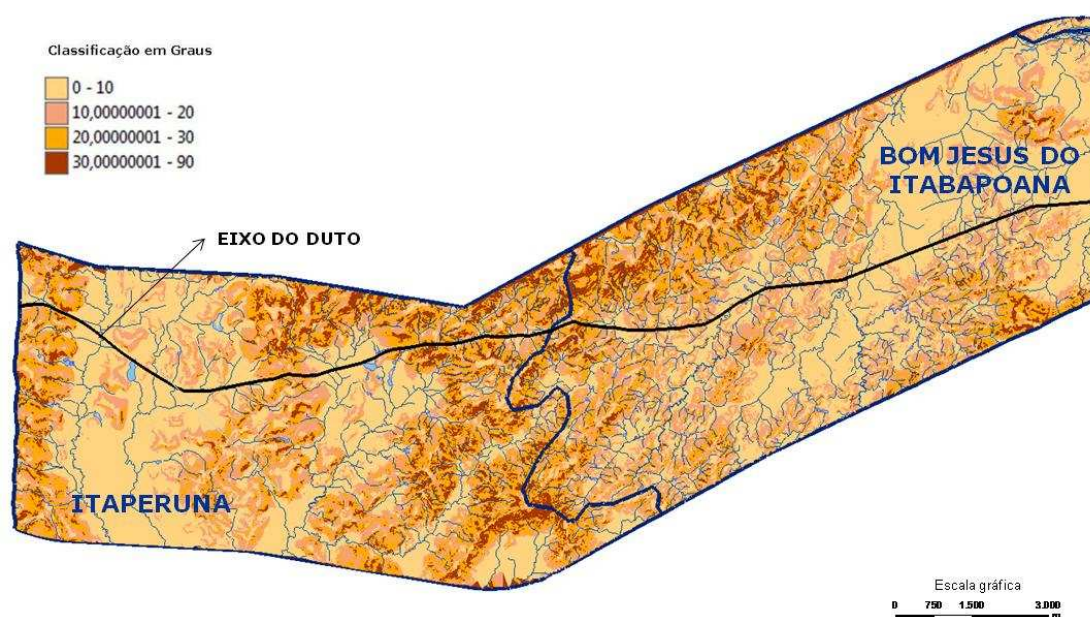


Figura 3.11 – Exemplo do mapa de declividade do terreno (ângulos em graus com a representação do mineroduto).

Conforme visto no Capítulo 2 deste trabalho, a forma de relevo ao longo do traçado do mineroduto é colinosa com vertentes convexas e topos tabulares. Assim, os processos erosivos ocorrem de maneira generalizada, sobretudo, em áreas de colinas de encostas com maior declividade.

A declividade está correlacionada com os fatores morfogenéticos que vão modelar a superfície terrestre como, por exemplo, os movimentos de massa; e também pode até ser considerada como o principal agente transformador dentre esses fatores.

A variação da declividade vai propiciar a ação da gravidade sobre o material intemperizado podendo esse ser deslocado com maior ou menor velocidade. Christofolletti (1980) ressalva que a gravidade é considerada, implicitamente, a única força importante para os movimentos de massa mais do que qualquer outro como a água em movimento, vento ou gelo.

Entretanto, o mesmo autor explicita que embora a água em movimento esteja excluída do processo, a presença dela exerce função importante no movimento do regolito por reduzir o coeficiente de fricção e por aumentar o peso da massa intemperizada, preenchendo os espaços entre os poros.

Dos tipos de movimento de massas, o mais perceptível ao longo do eixo é o rastejo. Esse pode ser identificado pela presença de árvores com troncos recurvados, deslocamento de muros de proteção, existência de rodovias fora de alinhamento, deslocamento de postes, cercas e marcos dentre outros. Exemplos podem ser vistos nas Figuras 3.12, 3.13 e 3.14.



Figura 3.12 – Troncos de árvores recurvados indicam movimento de massa por rastejo.



Figura 3.13 – Deslocamento do muro de arrimo devido à movimentação do solo.



Figura 3.14 – Alta declividade indicando movimento de massa.

3.2.5 Dados Existentes (Dados de empresas especializadas e órgãos públicos)

Dados adquiridos em órgãos públicos e cedidos pelo cliente contribuíram para completar a superfície de custo, uma vez que serviram para identificar e delimitar áreas importantes ou que poderiam vir a ser de alto custo de indenização como, áreas de direitos minerários (concessão e requerimento de lavra), distância mínima de centros urbanos, áreas de importância biológica, nascentes e sistema de drenagens.

Os dados espaciais existentes têm como fontes os seguintes órgãos:

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com o SiGeo;
- Ministério do Meio Ambiente(MMA) com o i3GEO *Open Layers*;
- Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) com o SigMine – Sistemas de Informações geográficas da Mineração.

Os dados cedidos pelo cliente são referentes às informações de nascentes e sistemas de drenagem. A Tabela 3.3 mostra os dados e suas respectivas fontes.

Atividade	Feições Identificadas
IBGE	Mapas topográficos (áreas urbanizadas – checar com dados cedidos pelo cliente)
SiGeo (ANEEL)	Dados de Hidrografia (utilizado para checar com os dados cedidos pelo cliente) e área de influência de UHEs, PCHs, CGHs e UTEs.
i3GEO (MMA)	Informações sobre concessão e requerimento de lavra.
SigMine (DNPM)	Informação sobre áreas prioritárias para conservação da biodiversidade e requerimento de lavra (pessoa física).

Tabela 3.3 – Dados adquiridos de órgãos públicos

Importante salientar que a projeção, o sistema de coordenadas e o *datum* de referência foram analisados com atenção. Os dados provenientes dos órgãos públicos ou não

possuíam referência espacial ou, quando apresentavam, encontravam-se na referência WGS84.

Os dados foram trabalhados em uma única referência espacial e, para isso, todas as informações adquiridas foram reprojetadas para a mesma base e com a mesma referência (UTM-SAD69).

Os mapas topográficos serviram para delimitar as áreas urbanas. Para a aplicação das funções de distância ponderada na superfície de custo, a informação referente aos centros urbanos teve incorporada um *buffer* de 2km.

Esses dados foram conferidos juntamente com as manchas urbanas dos arquivos de restituição. Esse procedimento fez-se necessário, pois esses últimos não possuíam todas as extensões das manchas urbanas.

Os dados adquiridos da ANEEL foram hidrografia, que serviu para complementar a rede de drenagem cedida pela Ferrous pela restituição; e informações de localização de UHEs (Usinas Hidroelétricas), PCHs (Pequenas Centrais Hidroelétricas), CGHs (Centrais Geradoras Hidrelétricas) e UTEs (Usinas termelétricas) as quais tiveram de ter delimitada uma área de influência.

Os dados da ANEEL foram pelo Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico – o SIGEL. A agência declara que esse sistema foi concebido com a expectativa de tornar-se um instrumento de referência na busca de informações consistentes e consolidadas, convergindo em um mesmo ambiente computacional, dados e informações disseminadas em vários subsistemas isolados de interesse corporativo, desenvolvidos interna ou externamente.

Requerimento, licenciamento e concessões de lavra foram obtidos pelo i3GEO. Esse sistema se diferencia do SIGEL basicamente pelo fato de ser um *software* para internet baseado em outros *softwares* livres com o objetivo de disponibilização de dados geográficos e um conjunto de ferramentas de navegação, geração de análises, compartilhamento e geração de mapas sob demanda, ministradas pelo Ministério do Meio Ambiente.

As informações e pedidos são referentes tanto a indústrias quanto a pessoas físicas. Isso já pode ser considerada uma primeira segregação do nível de importância de cada licenciamento ou concessão.

Informações sobre áreas prioritárias para conservação da biodiversidade e requerimento de lavra (pessoa física) foram obtidas pelo SigMine do DNPM. O Sistema de Informações Geográficas da Mineração – SIGMINE foi desenvolvido pela Coordenação de Geoprocessamento – CGEO/CGTIG, e tem como objetivo ser um sistema de referência na busca de informações atualizadas relativas às áreas dos processos minerários cadastrados no DNPM.

O principal dado adquirido pelo i3GEO foi a informação de áreas com importância extremamente alta com formação geológica única; endemismos de fauna e flora; e que abriga importantes mananciais de abastecimento da região metropolitana do município de Belo Horizonte, Minas Gerais.

Os dados de drenagem, nascentes e edificações foram obtidos dos arquivos de restituição cedidos pela Ferrous. Importante salientar que o tratamento e a delimitação de áreas de influência tanto para as drenagens quanto para as nascentes foram seguidos os parâmetros legais estipulados pela Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, também conhecida como código florestal.

Apesar desse se encontrar ainda em discussão no que tange sua reforma, foi seguido o que é citado no código florestal vigente, a qual segue parcialmente abaixo:

Art.2 - Considera-se de preservação permanente, pelo só efeito desta Lei, as florestas e demais formas de vegetação natural, situadas:

a) ao longo dos rios ou de qualquer curso d'água desde o seu nível mais alto em faixa marginal cuja largura mínima seja:

1 - de 30 m (trinta metros) para os cursos d'água de menos de 10 m (dez metros) de largura;

2 - de 50 m (cinquenta metros) para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 m (cinquenta metros) de largura;

3 - de 100 m (cem metros) para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 m (duzentos metros) de largura;

4 - de 200 m (duzentos metros) para os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 m (seiscentos metros) de largura;

5 - de 500 m (quinhentos metros) para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 m (seiscentos metros).

* Alínea "a" com redação dada pela Lei número 7.803, de 18/07/1989.

b) ao redor das lagoas, lagos ou reservatórios d'água naturais ou artificiais;

c) nas nascentes, ainda que intermitentes e nos chamados "olhos d'água", qualquer que seja a sua situação topográfica, num raio mínimo de 50 m (cinquenta metros) de largura;

3.3 Métodos

3.3.1 Superfície de Custo

De acordo com C. Yu *et al.* (2003) para se encontrar o caminho de menor custo entre um ponto de partida e um destino em uma dada malha digital de elevação, existem dois passos importantes. O primeiro passo é criar uma superfície de custo acumulado considerando todos os fatores relevantes. O segundo passo é construir o caminho de menor custo com base no modelo de inclinação utilizando a superfície de custo acumulado.

A superfície de custo representa um fator ou uma combinação de fatores que afetam a travessia de alguma feição geograficamente representada em um ambiente computacional, como por exemplo, uma estrada, um projeto de linhas de transmissão ou mesmo um mineroduto através de uma determinada área.

Um dos principais aspectos vistos pela geotecnia como fator de risco a qualquer obra linear, que por se constituir um obstáculo ou simplesmente por encarecer demasiadamente uma obra, é a declividade. Terrenos íngremes podem aumentar os custos de construção de uma obra linear, de modo que a inclinação do terreno é considerada um fator de custo.

Assim, ao gerar uma superfície de declividade percebe-se que valores percentuais ou mesmo em graus não refletem em si mesmos um indício de que os custos são altos ou baixos. Para refletir o custo ou para criar a superfície de custo é preciso utilizar-se de uma escala comum.

A Figura 3.15 ilustra a aplicação do conceito de escala comum para um exemplo de dados de declividade. É realizada uma reclassificação do dado matricial para que esse possa ser reamostrado.

Declividade em porcentagem					Declividade reamostrada				
9.14	10.57	10.83	35.98	45.63	1	2	2	9	9
8.33	9.79	18.11	40.29	45.01	1	1	6	9	9
8.68	13.23	25.29	37.45	38.56	1	4	9	9	9
9.05	12.37	15.67	23.34	19.04	1	5	4	9	6
8.67	10.18	12.96	15.89	17.21	1	2	3	4	5

Figura 3.15 – Exemplo de amostragem dos dados de declividade (modificado da apostila *Advanced Raster Spatial Analysis* – ESRI).

A formatação e a reclassificação de cada feição em uma escala comum possibilitam a utilização de álgebra de mapas com processamentos condicionais e operadores diversos. Uma vez que os dados adquiridos vieram de entidades diferentes, o passo fundamental foi formatar esses dados para que pudessem ser utilizados em uma mesma base.

Para isso, cada dado ou conjunto de dados foi reclassificado e re-projetado utilizando-se de uma mesma resolução (10mx10m). Os valores referentes às escalas, ou *ranking*, dos dados são melhor explicados no capítulo seguinte, pois para a comparação das diversas opções de traçado, esses podem ser alterados diversas vezes.

3.3.2 Análise multicritério

Neste trabalho busca-se a aplicação de uma análise comparativa dos diversos fatores que influenciam, em distintos graus, as tomadas de decisão sobre o traçado do mineroduto. Em linhas gerais, Jankowski (1995) afirma que as análises de decisão multicritério servem para assistir o tomador de decisão na seleção da “melhor” alternativa a partir de um número de várias alternativas viáveis na presença de critérios diversos.

De acordo com Malczewski (2006a), vários métodos de avaliações multicritério (regras de decisão) têm sido implementadas em ambientes computacionais de SIG. Isso é muito interessante considerando a capacidade de espacialização de dados dos SIG, como por exemplo, a capacidade de gerar mapas de critérios (superfícies de custo).

Esses mapas de critérios podem ser qualitativos, como por exemplo mapas de uso e ocupação do solo e também quantitativos, como o aumento da distância à medida que há o afastamento do ponto de origem. Assim, dados os critérios, o problema é combinar os mapas para que dentre todos eles, possa ser identificado o melhor caminho para se estabelecer a rota do mineroduto.

Segundo Malczewski (2006a), uma análise de decisão multicritério aplicada em um ambiente computacional de SIG envolve a utilização de dados geográficos, as preferências do tomador de decisão e da combinação (ou agregação) dos dados e preferências conforme as regras de decisão específicas.

Malczewski (2006b), salienta que os procedimentos e técnicas da ferramenta SIG possuem um importante papel em analisar problemas de decisões e que as análise de decisão multicritério provem uma coleção rica de técnicas para estruturar problemas de decisão, além de desenhar, avaliar e priorizar decisões alternativas.

Deste modo, a união entre os métodos de análise multicritério e o ambiente computacional SIG foi de muita valia, pois conforme Malczewski (2006b) essa pode ser vista como um processo que transforma e combina dados geográficos e julgamento de valor (as preferências do(s) tomador(es) de decisão) a fim de se obter informação para as tomadas de decisão.

Etapas da análise multicritério serviram, principalmente, para dar os respectivos pesos a cada uma das feições utilizadas no modelo, definindo a importância de cada uma delas na análise. Por meio dessa técnica podem ser considerados diversos critérios, simultaneamente, na análise de uma situação complexa.

Assim, realizou-se diversas reuniões para validação de critérios concomitantemente aos trabalhos de campo realizados ao longo do tempo de projeto.

Jankowski (1995) salienta a importância da preferência (capacidade de julgamento) do tomador de decisão, além dos valores de cada critério ao realizar uma análise. Essa capacidade de julgamento pode ser formulada baseada nos valores dos critérios admitindo alguns valores de corte ou de níveis desejados.

Malczewski (2006b) diz que a soma ponderada e procedimentos afins são, de longe, as abordagens mais populares em análises de decisão multicritério.

Os parâmetros agregados a cada uma das feições possibilita a construção de cenários para auxiliar as tomadas de decisão quanto ao melhor traçado para o mineroduto da Ferrous. Importante lembrar que o objetivo desse tipo de análise é oferecer um produto mais operacional possível, possibilitando formular recomendações práticas para as atividades de campo e do projeto em si.

Os dados matriciais utilizados na análise foram associados a uma escala de 1 a 4, em que o valor 1 representa um menor custo, ou uma menor resistência aos aspectos do traçado, e o valor 4 representa uma maior resistência.

As feições mais importantes na implantação do modelo que poderiam afetar significativamente o custo do caminho do mineroduto incluem: matas, afloramentos de rocha, processos erosivos, depósitos de pé de encosta, áreas alagadas, declividade, áreas de extrema importância para biodiversidade, requerimentos e concessões de lavra e distância de edificações existentes e de estruturas civis como PCHs.

A Tabela 3.4 destaca as feições utilizadas para a geração da superfície de custo e seus respectivos graus de relevância.

Feições	Relevâncias
Áreas Alagadas	As variações frequentes do nível de água podem ocasionar recalque por adensamento, eventual ruptura de apoios.
Rocha	Os afloramentos de rocha podem acarretar em um maior custo de escavação.
Processos erosivos	Refletem as regiões com processos erosivos visíveis na escala de 1:30.000 (ortofotos) e podem ocasionar instabilização ou solapamento do apoio do duto.
Depósitos de pé de encosta	São áreas de grande relevância, pois podem apresentar rastejos, escorregamentos, aparecimento de nascentes, maior susceptibilidade a erosão e podendo causar recalque ou deslocamentos do eixo do mineroduto.
Matas	Áreas verdes referentes a matas podem ser tanto áreas de silvicultura quanto de mata nativa. Dependendo da área pode estar enquadrada em unidades de conservação.

Tabela 3.4 – Dados e relevâncias (continua na página seguinte)

Feições	Relevâncias
Declividade	O fator declividade é o principal ponto para a geotecnia e implica em regiões de grandes cortes e instabilizações.
Requerimento de e Concessão de lavra	Dependendo da área, as concessões e requerimentos podem ser de pessoa física ou de entidades especializadas como indústria. Esta última pode vir a ser uma restrição.
Áreas de importância para biodiversidade	São regiões de importância e prioridades extremamente altas para a preservação de biodiversidade. Pode acarretar entraves em órgãos públicos.
Área de influência de PCHs	Zonas limítrofes a essas estruturas e que com a construção do mineroduto pode haver alguma ameaça a integridade das mesmas, principalmente se houver escavação em rocha.

Tabela 3.4 – Dados e relevâncias (Continuação)

3.3.3 Caminho de menor custo

De acordo com o Instituto de Pesquisas de Sistemas Ambientais (em inglês ESRI²) se o caminho mais curto entre dois pontos é uma linha reta, então o caminho de menor custo é o caminho de menor resistência.

Análises para o caminho de menor custo usam a distância de custo ponderado e superfícies de direção de uma área para determinar uma rota custo-benefício entre uma origem e um destino.

O traçado é desenhado por meio de análise de células vizinhas por meio de algoritmos. C. Yu *et al.* (2003) descreve que para que algoritmos sejam usados para encontrar o caminho de menor custo, uma rede com nós, ou malha regular, deve ser construída e esses nós devem estar conectados. Isso estabelece o conceito de vizinhança entre as células do dado matricial.

2 – ESRI – Environmental Systems Research Institute acessado no site <http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/spatialanalyst/distance.html>, no dia 05/05/2011.

O mesmo autor, ao citar Goodchild (1977), Bemmelen *et al.* (1993) e Xu and Lathrop (1994, 1995) exemplifica algumas definições de vizinhança utilizadas em análises de dados matriciais como o padrão de *Rook* com 4 células ortogonais, o padrão de *Queens* com oito células, sendo 4 ortogonais e 4 no sentido diagonal, e o padrão de *Knight* com 16 células. A Figura 3.16 ilustra os três tipos de vizinhança.

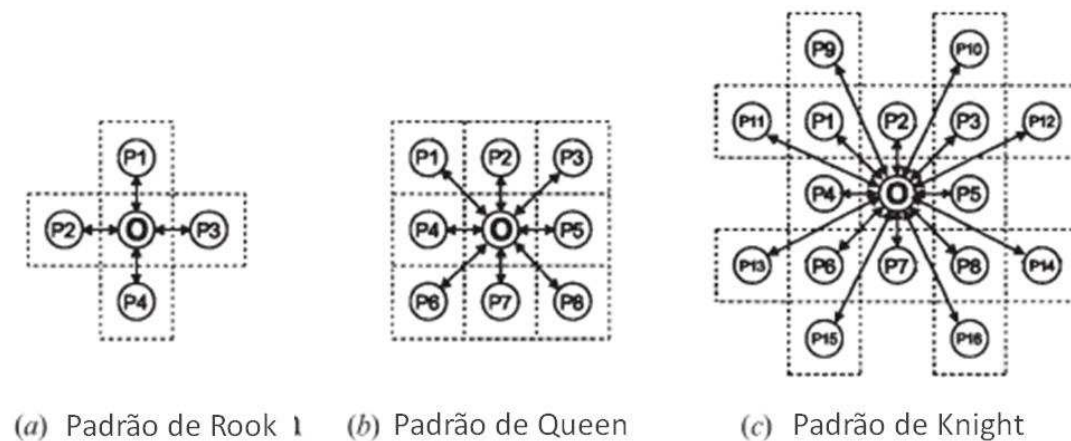


Figura 3.16 – Três tipos de padrão de vizinhança em dados matriciais (modificado deC. Yu *et al.* (2003)).

Para este estudo, a análise de caminho de menor custo considerada foi o padrão de *Queens* (figura 3.16 b), onde os oito vizinhos de uma célula são avaliados e o caminho se move para a célula com o menor valor acumulado. O processo se repete até que a origem e o destino são conectados. O caminho concluído representa a menor soma de valores de célula entre os dois pontos.

3.4 Conclusão

Este capítulo apresentou os dados necessários e a forma com que foram obtidos e tratados para a elaboração da superfície de custo e aplicação das funções de custo de distância ponderada.

No próximo capítulo serão criadas as superfícies de custo ponderado, realizadas análises por meio da aplicação da função de custo e distância ponderada e apresentação de resultados para o traçado do mineroduto da Ferrous.

4. ANÁLISE COMPARATIVA DE TRAÇADOS DO MINERODUTO DA FERROUS

4.1 Introdução

A maneira mais comum de criar uma malha é usar uma combinação de fatores de custo ou fricção para criar uma superfície de custo ou superfície de fricção acumulado. Diversos critérios de avaliação podem ser combinados, e cada célula no grid é assinada com um valor que expressa o esforço relativo para ser transposta, o qual pode ser em termos de custo, tempo, distância ou risco (Collischon e Pila, 2000).

Lee e Stucky (1998) comentam que a computação de caminhos de menor custo é a ferramenta mais interessante de se utilizar para se determinar o caminho ótimo a partir de um ou mais pontos de origem para um ou mais pontos de destino.

Este trabalho apresenta um modelo de caminho de menor custo em uma base *raster* de largura determinada ao longo de toda a trajetória. Importante lembrar que, uma vez que este trabalho é resultado de um relatório técnico de geologia de engenharia, buscou-se utilizar os dados fornecidos pelo cliente, tentando alcançar os resultados mais satisfatórios possíveis.

4.2 Preparação dos dados

Atkinson *et al.* (2005) apontam que a análise de caminho de menor custo requer um processo conhecido como avaliação multi-critério para determinar a importância relativa (pesos) dos múltiplos fatores. Isso foi realizado pela equipe de projeto.

Conforme explicado no item 3.2.5, para a classificação do mapa de declividade foi obedecido o critério de 15% (9°) conforme especificação da Ferrous. Uma declividade superior a esta implicaria em possíveis problemas de funcionamento do mineroduto. Assim, a classificação dos dados de declividade foi de 0° a 10° (áreas correspondentes aos 15%), de 10° a 20°, de 20° a 30° e acima de 30°, conforme ilustrado na Figura 3.13.

Desta forma, a base matricial referente à declividade foi subdividida em quatro categorias conforme explicado acima, uma vez que a informação geotécnica e/ou geomorfológica para o traçado de uma obra linear é por muitos considerado um ponto crítico, merecedora de atenção e uma análise mais detalhada.

Para tal, seguindo o que foi explicado por Vilas Boas (2011), utilizou-se uma adaptação do método *Analytic Hierarchy Process*(AHP) para análise multicritério. Autores como Jianyuan

(1992) e Steiguer, Duberstein e Lopes (2005), inferem que esse método possui vários atributos desejáveis para a realização do estudo proposto como: a) é um processo de decisão estruturado que pode ser documentado e repetido; b) é aplicável a situações que envolvem julgamentos subjetivos; c) utiliza tanto dados quantitativos como qualitativos; d) provê medidas de consistência das preferências; e) há uma ampla documentação sobre suas aplicações práticas na literatura acadêmica; f) seu uso é apropriado para grupos de decisão.

O método AHP tem sido empregado no ambiente SIG com o intuito de se obter as ponderações associadas com os atributos de mapas gerados (Malczewski (2006b)). Esse método baseia-se na capacidade humana de usar a informação e a experiência para estimar magnitudes relativas através de comparações par a par (*pairwise comparisons*), segundo explicam Toma e Asharif (2003). Trata-se de uma abordagem flexível que utiliza a lógica aliada à intuição, com a finalidade de obter julgamentos através de consenso pelo grupo tomador de decisões.

De acordo com Dodgson et al. (2001), os principais *inputs* para a construção de uma hierarquia são as respostas obtidas para uma série de perguntas que, normalmente, possuem a forma geral: "Qual é a importância do critério 1 em relação ao critério 2?". Conforme Schimidt (1995), esse procedimento, conhecido por comparação par a par (*pairwise comparison*), é utilizado para estimar a escala fundamental unidimensional em que os elementos de cada nível são medidos.

Assim, sempre se comparava a declividade em relação as outras feições, com por exemplo: "Qual é a relação da declividade com as áreas com processos erosivos?" ou "Qual é a relação da declividade com as áreas com depósitos de pé de encosta?" Essas perguntas foram realizadas para todas as feições e com base nas respostas cada feição foi ponderada com um determinado valor. A Figura 4.1. mostra uma estrutura hierárquica genérica, na qual representa o método adotado.

Uma vez que os problemas de decisão podem ser categorizados em decisões com maior ou menor grau de certeza dependendo da quantidade de informação (conhecimento), é importante dizer que os critérios aqui apresentados refletem opiniões, experiência e preocupações geradas pelas partes envolvidas no projeto. E ainda que a influência para se estimar cada peso foi feita no conhecimento e experiência do analista e/ou como

resultados de discussões de planejamento provenientes do conjunto de experiência da equipe de trabalho.

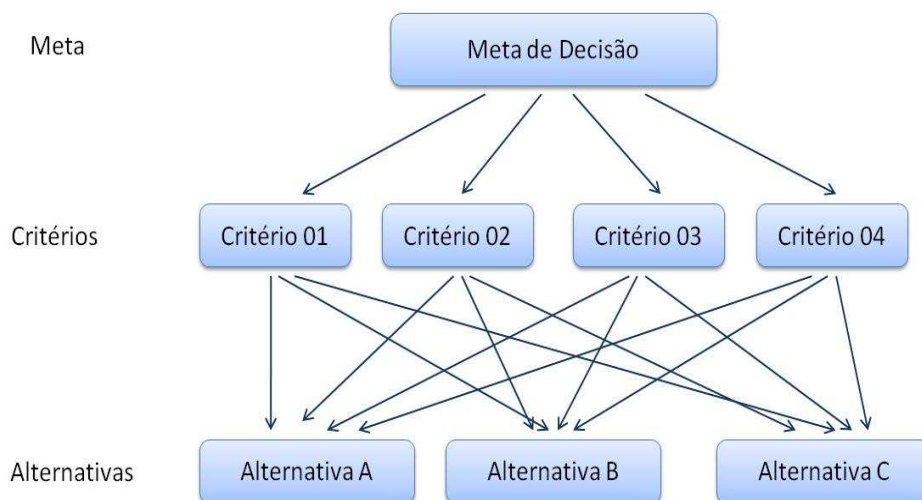


Figura 4.1 – Estrutura hierárquica genérica de problemas de decisão (modificado de Vilas Boas (2011))

Assim, como a respostas resultantes dessas interações são consideradas pontos críticos, resolveu-se, então, como estudo de caso propriamente dito, classificar as demais feições também em até quatro valores, conforme estipulado para a declividade, sendo o valor de ponderação 4 o mais resistente e 1 o de menor resistência.

As Tabelas 4.1 e 4.2 ilustram cada feição e seus respectivos valores e em seguida a explicação para a escolha dos mesmos.

Requerimento de lavra	Ponderação	Declividade	Ponderação
Concessão	3	0° - 10°	1
Requerimento pessoa jurídica	2	10° - 20°	2
Requerimento pessoa física	1	20° - 30°	3
		> 30°	4

Tabela 4.1 – Dados e respectivas ponderações

Uso da terra	Ponderação	Drenagens	Ponderação
Depósito de pé de encosta	4	Rios acima de 50 m	4
Matas	2	Rios entre 10 e 50 m	3
Pastagem	1	Rios menores do que 10 m	1
Afloramento de rocha	3		
Áreas Alagadas	2		
Áreas Erosivas	3		

Tabela 4.2 – Dados e respectivas ponderações

Importante lembrar que a modificação das ponderações, ou dos critérios de importância de cada feição, leva a elaboração de uma nova alternativa de traçado. Quantas tantas modificações forem realizadas, tantas alternativas serão geradas.

As áreas de pastagem em si não oferecem problemas ou riscos tanto geotécnicos quanto de legislação. São fáceis de serem indenizadas e assim, a ponderação teve valor 1, caracterizando-se como área ideal (menor resistência). Porém, deve ser sempre avaliada concomitantemente com os dados matriciais de declividade.

As áreas caracterizadas como matas são na verdade áreas de floresta natural, silvicultura de eucalipto e cultura de café. Qualquer uma dessas culturas não oferece muita dificuldade para indenização. Entretanto, as áreas de florestas naturais são mais problemáticas devido a necessidade de licenças ambientais.

Áreas de proteção permanente ou classificadas como áreas de parque ou proteção ambiental podem ser responsáveis por alterações no traçado do mineroduto. Porém, não oferecem resistência caso o mineroduto seja considerado uma obra de utilidade pública conforme citado na Lei n 4.771, de 15 de setembro de 1965: *“A exceção é a permissão de retirada da vegetação para execução de obras de interesse público, desde que com licenciamento ambiental e com a execução da compensação ambiental indicada.”*.

Para as drenagens também se seguiu o que está na lei do código florestal, conforme citado no item 3.2.6 e foram ponderadas da seguinte forma:

- rios acima de 50 metros de largura tiveram suas ponderações com valor 4, pois configuram-se em travessias especiais. Dessa forma, obras especiais devem ser executadas encarecendo o processo de instalação do mineroduto.
- rios entre 10 e 50 metros de largura foram ponderadas em 3, pois podem se configurar como travessias especiais ou não. Dependerá da capacidade e competência do rio.
- rios com até 10 metros de largura não foram considerados como fator de risco pela hidrologia e/ou geotecnia do projeto do mineroduto, pois a dinâmica fluvial, em sua maioria, não apresenta ameaça à obra. Assim tiveram seus valores em 1.

As áreas consideradas como alagadas ou alagáveis tiveram sua ponderação em 2 pelo fato do mineroduto poder ser instalado nessas áreas sem maiores problemas. Porém, dependendo de sua extensão e profundidade, podem ser consideradas áreas instáveis devido à possibilidade de recalque. Entretanto, esse tipo de situação não foi verificado. Áreas alagadas extensas estão presentes apenas na parte final do mineroduto, mas não oferecem ameaça ao mesmo.

Os depósitos de tálus, ou depósitos de pé de encosta, identificados no processo de fotointerpretação, representam áreas de instabilidade geológico-geotécnica. São áreas com relevo marcado por acúmulo de detritos de escorregamentos anteriores ou solo em processo de rastejo. Apresentam problemas como rastejos, escorregamentos, aparecimento de nascentes, zonas de matações, maior susceptibilidade a erosão podendo ocasionar em deslocamentos do eixo do mineroduto. Desta forma, tais áreas tiveram uma ponderação de valor 4.

Os afloramentos de rocha representam um maior custo de escavação, pois são áreas consideradas com grau de escavabilidade classe 3, ou seja, desmonte a fogo. Assim, o valor ponderado para essas áreas foi de 3.

Para as feições erosivas foi atribuído um valor de 3, pois são áreas de instabilidade geológico-geotécnica por ocasionar solapamento da base do mineroduto. Muitas das áreas já apresentam processos de movimentação de massa como rastejos.

As áreas de requerimento de lavra tiveram o valor de ponderação de 1, 2 e 3 dependendo da situação. As áreas de concessão tiveram um maior valor (3), pois, por via de regra, nessa fase a lavra já deverá estar pesquisada, com o relatório de pesquisa aprovado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Também leva em consideração que

a área de lavra será a adequada à condução técnico-econômica dos trabalhos de extração e beneficiamento, respeitados os limites da área de pesquisa.

O requerimento de lavra são apresentados com valores de 1 e 2 quando feitos por pessoa física e por pessoa jurídica, respectivamente. Por efeitos práticos, um requerimento feito por pessoa jurídica faz referência às grandes mineradoras que visam a produção e comércio do minério. Portanto, cumprida todas as etapas do que manda a legislação, o empreendimento pode ser implantado.

Já o requerimento por pessoa física, muitas vezes é negado e o requerente o faz com o intuito de valorizar suas terras, uma vez que não possui equipamento nem equipe para, de fato, empreender a exploração do minério. Geralmente vende suas terras para empresas minerárias.

Foram identificadas ao longo do traçado 3 PCHs (pequenas centrais hidroelétricas). Foi considerado um *buffer* de 1 Km para evitar qualquer interferência a essas instalações. Assim, tiveram um valor ponderado de 4, tentando assim que a função de menor custo evitasse tais áreas.

Moghaddam e Delavar (2007) salientam a importância dos pesos, e afirmam que o peso de cada fator do mapa de fricção indica a importância de seu custo e valor quando comparados entre si. Lee e Stucky (1998) destacam que o caminho ótimo pode ser baseado em diversos critérios. Para cada critério, a superfície de fricção é construída como base para essa otimização.

Em um problema de caminho de menor custo o qual envolve mais critérios de avaliação, o número de superfície de fricção dependerá do número de critérios aplicados. Os caminhos de menor custo devem ser computados baseando-se em um ou mais critérios.

Assim, é importante dizer que a ponderação aqui apresentada é o resultante do trabalho de diversos profissionais, podendo variar conforme os objetivos de projeto, gestão e importância dos fatores no contexto em que o projeto se encontra.

4.3 Análise

Para a montagem da superfície de custo todas as feições identificadas foram associadas em uma mesma base matricial segundo os critérios apresentados por Y. Choi *et al.* (2008).

Esses autores salientam os pontos comuns ao tentar encontrar o caminho de menor custo em uma superfície particionada ou de diferentes resistências a movimentos, a saber:

1 - Um *grid* de pesos adversos é criado para cada critério de avaliação, onde cada célula no *grid* possui um valor baseado no custo relativo que levaria para transpor aquela célula;

2 - *Grid* de pesos adversos são combinados para a criação da superfície de custo geral representando o custo total associado com as travessias de cada célula;

3 - Uma função de espalhamento combina os pontos de destino com a superfície média de custo para gerar uma superfície de custo acumulado;

4 - Uma linha de menor valor é traçada ao longo da superfície de custo acumulado do ponto de origem até o ponto de destino.

Assim, segundo C. Yu *et al.* (2003), a linha de menor valor resultante da análise de caminho de menor custo geralmente é considerada o caminho ótimo o qual pode minimizar a resistência acumulada do movimento do ponto de partida até o ponto de destino.

Lee e Stucky (1998), ao citar Douglas (1993) descrevem que o procedimento computacional para a elaboração do caminho ótimo, a saber:

“...para a criação de superfície de custo deve-se utilizar uma função de espalhamento a qual vai procurar por uma célula adjacente (células vizinhas diagonais, verticais ou horizontais) a partir de uma das células-fonte as quais possuem o menor valor. Após selecionar a célula de menor valor, o procedimento continua procurando a próxima célula de menor valor. Assim, a célula anteriormente verificada e selecionada é considerada a célula-fonte para que as suas células adjacentes possam ser analisadas e marcadas com o menor valor. O procedimento se repete até que toda célula do grid esteja associada a um valor acumulado de custo.”

A Figura 4.2 mostra o fluxograma como foi elaborado o caminho de menor custo para o mineroduto da Ferrous.

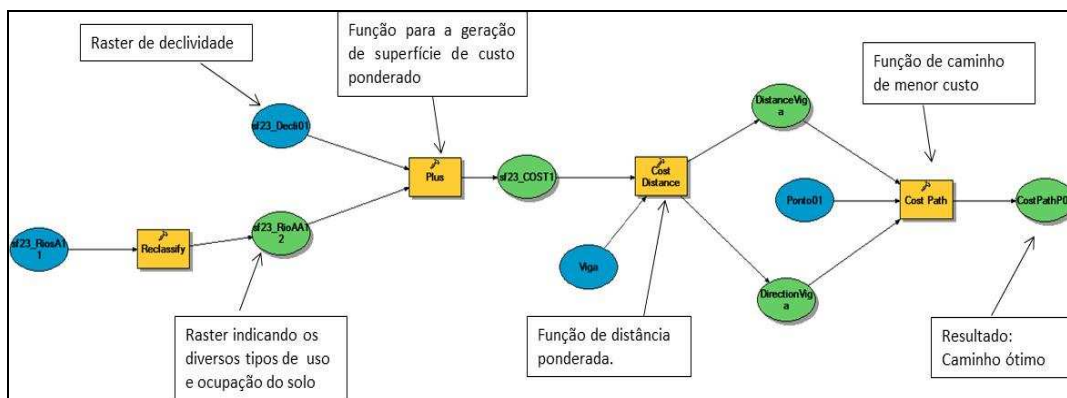


Figura 4.2 – Fluxograma representando a geração do caminho de menor custo para o mineroduto.

4.4 Resultados

Esta dissertação conseguiu identificar o que é citado por Jankowski (1995), que técnicas de tomadas de decisão multicritério oferecem amplo potencial como ferramenta de suporte de decisão espacial. O propósito de se usar um método de análise multicritério é auxiliar o tomador de decisão (ou grupo tomador de decisão) na seleção da melhor alternativa para o traçado do mineroduto da Ferrous Resources do Brasil S/A.

A Figura 4.3 ilustra a cobertura e o uso e ocupação do solo para a área de estudo. Na imagem pode-se perceber um maior destaque para as áreas verdes (pastagens e matas). A base matricial desse mapa foi utilizada para a aplicação das ponderações as quais foram determinadas pelo método multicritério AHP (Figura4.4) e após associação com o raster de declividade é gerada a superfície de custo (Figura 4.5).

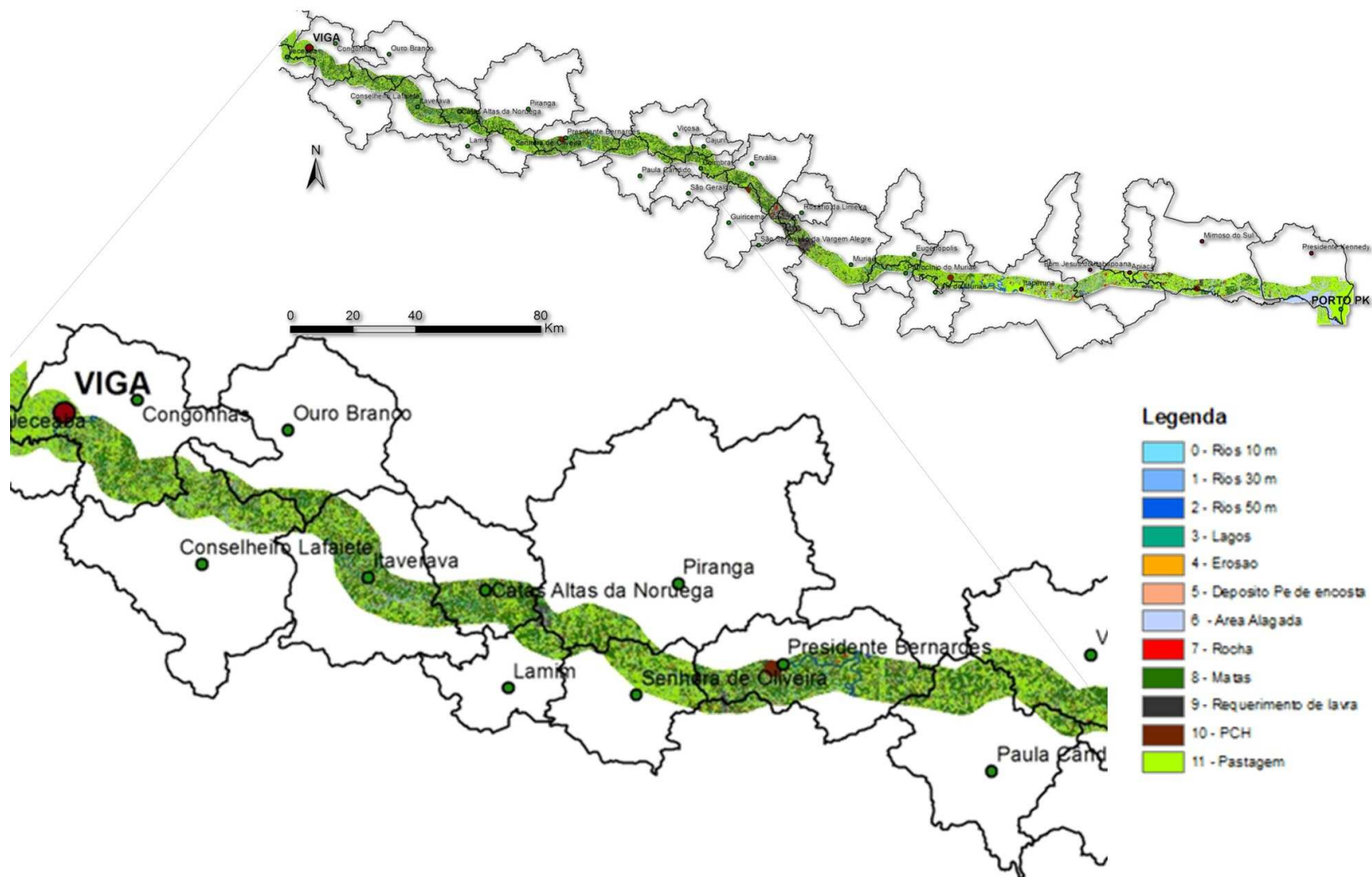


Figura 4.3 – Mapa de uso e ocupação e cobertura do solo (destaque para a parte inicial da área de estudo).

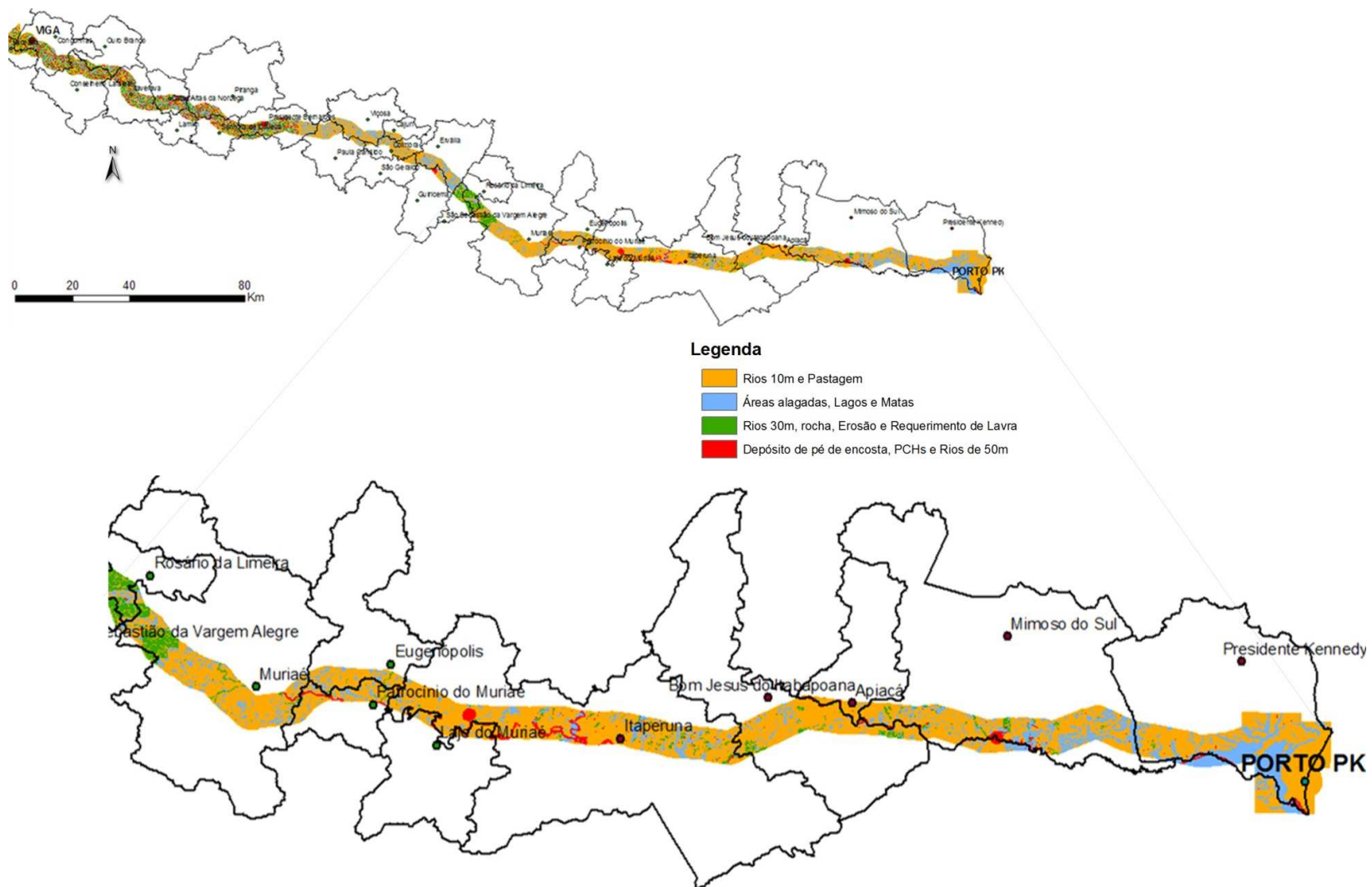


Figura 4.4 – Mapa de ponderações (destaque para a parte final da área de estudo).

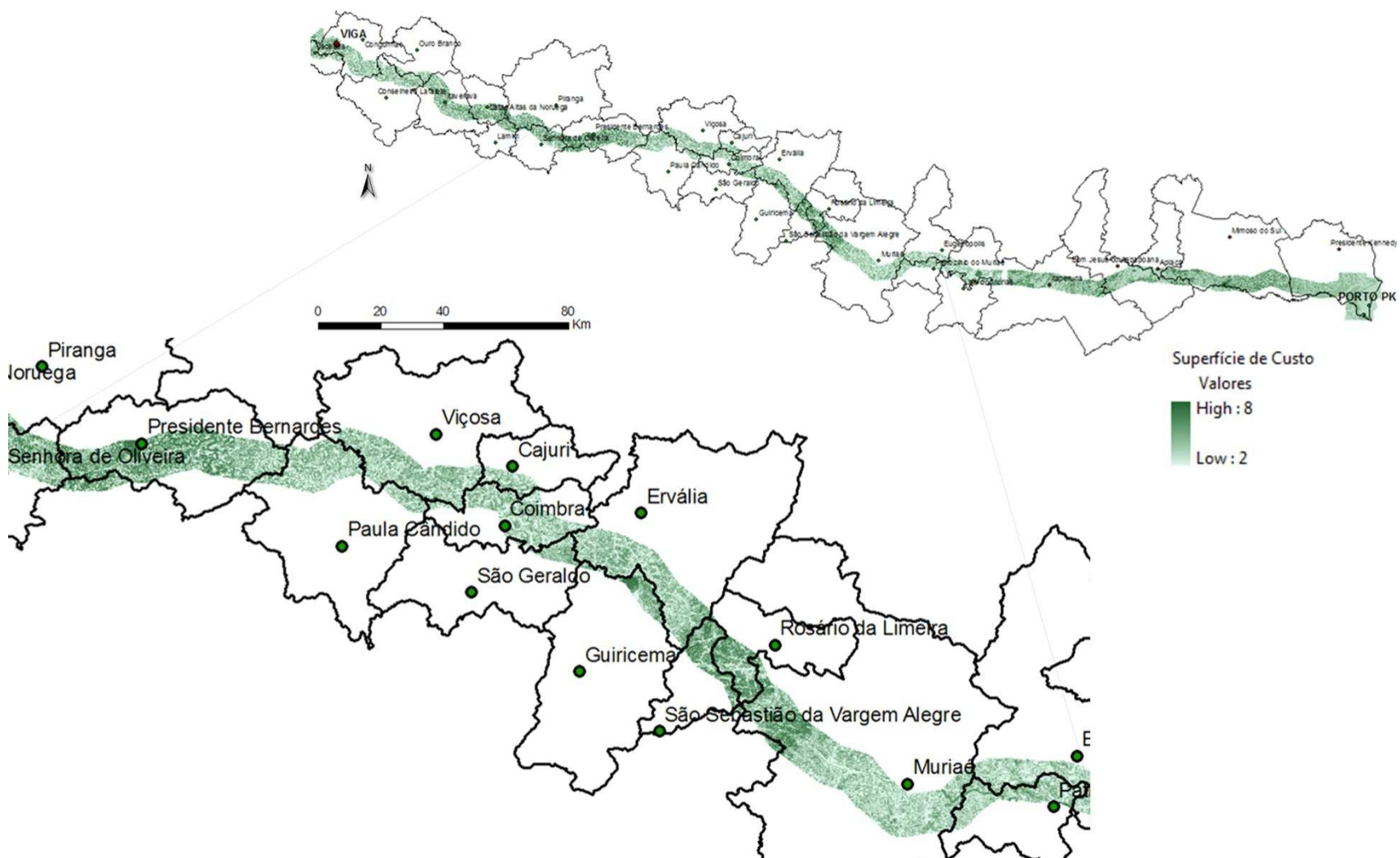


Figura 4.5 – Mapa de custo (destaque para a parte central da área de estudo).

A superfície de custo total representa a resistência total encontrada para percorrer todo o trajeto do mineroduto, da mina de VIGA (MG) até o porto em Presidente Kennedy (ES). Essa encontra-se representada em verde, onde os tons mais claros indicam uma menor resistência (valor de 2) e os tons mais escuros indicam uma maior resistência (valor 8).

Para validar e comprovar a eficácia do método de análise multicritério e da aplicação da função de distância ponderada para o caminho de menor custo para o mineroduto da Ferrous foi realizada uma comparação entre o traçado gerado em análise e o traçado preliminar elaborado pela própria Ferrous. A Figura 4.6 ilustra, já no início do traçado, uma bifurcação entre os eixos no município de Congonhas.

Embora uma linha reta seja considerada a menor distancia entre dois pontos, isso é evitado pois o algoritmo utilizado para encontrar o caminho de menor custo busca as células da matriz as quais possuem o menor valor de resistência.

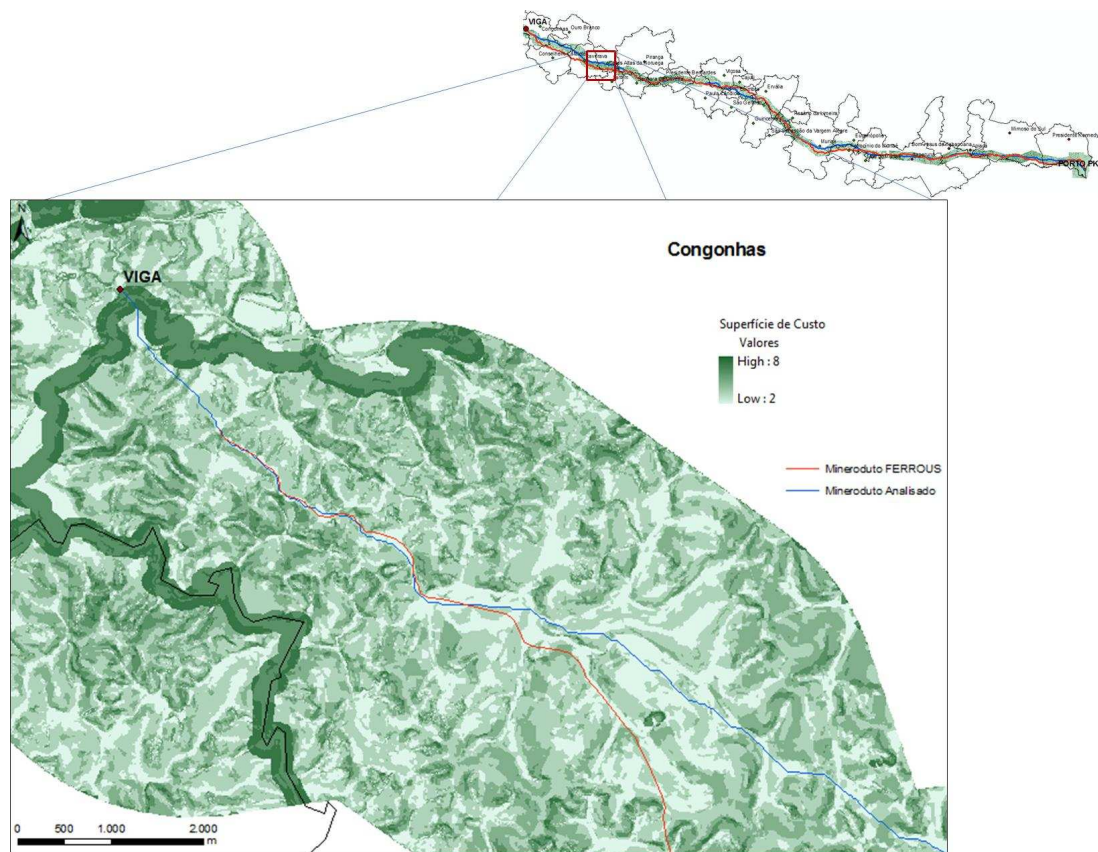


Figura 4.6 – Diferença de eixos propostos sobrepostos à superfície de custo (em verde).

Ao longo do percurso outras diferenças são apresentadas, como a ilustrada na Figura 4.7, onde se verifica uma maior distinção entre os traçados.

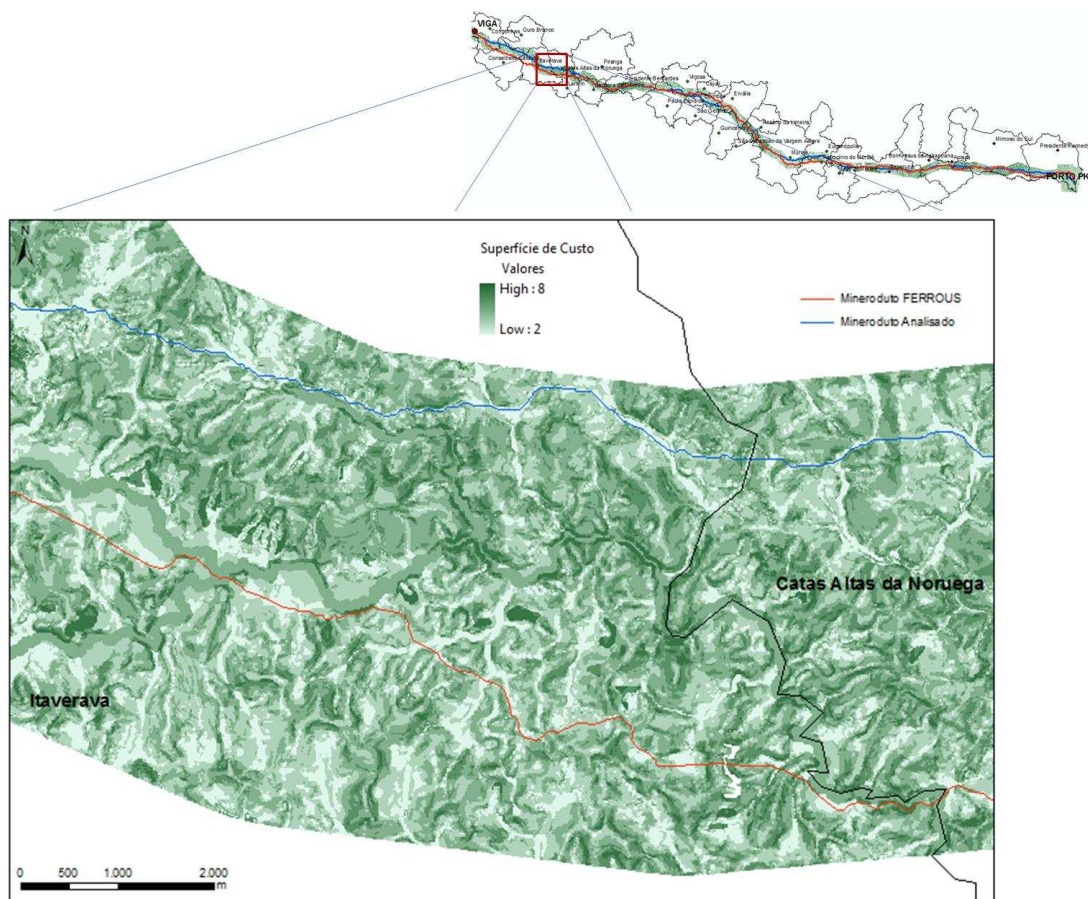


Figura 4.7 – Diferença de eixos propostos entre os municípios de Itaverava e Catas Altas da Noruega, em Minas Gerais, sobrepostos à superfície de custo (em verde).

Esse comportamento ocorre ao longo de todo o trecho, nos quais muitos setores apresentam diferenças significativas entre os traçados enquanto que em outros os traçados perfazem caminhos semelhantes. Conforme ilustrado na Figura 4.8, os eixos voltam a seguir quase um mesmo percurso após aproximadamente 60km, no município de Piranga, MG.

Isso mostra um resultado interessante ao associar o resultado da análise com os trabalhos de campo, onde se verificou a melhor opção para o mineroduto. Essa associação caracteriza-se como um ponto forte de validação de serviços de campo e comprova a robustez do método de análise para trabalhos futuros. Oferece também uma resposta positiva à forma com que o método de análise foi utilizado ao usar a informação e a experiência para estimar magnitudes relativas por meio de comparações entre os critérios.

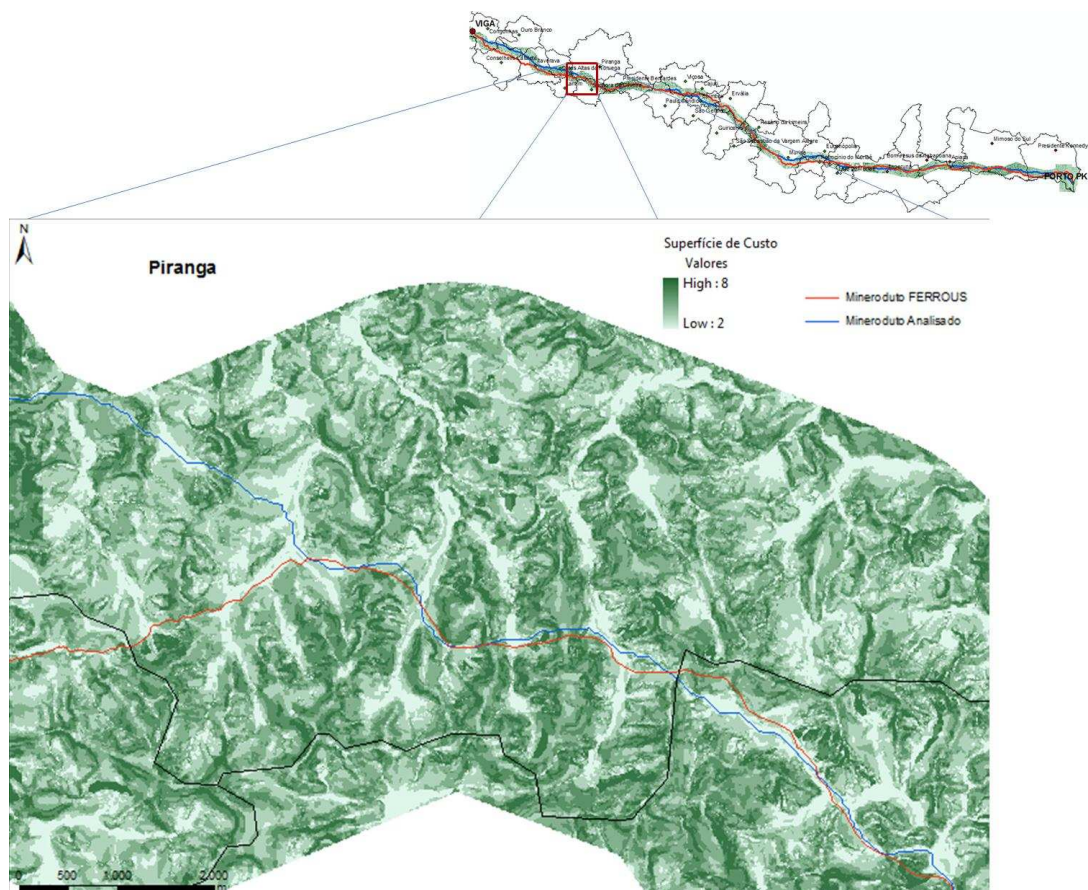


Figura 4.8 –Eixos propostos seguindo quase um mesmo trajeto no municípios de Piranga, em Minas Gerais.

A primeira grande validação e comprovação da funcionalidade da função de custo de menor caminho é a diferença apresentada no município de Presidente Bernardes, em Minas Gerais. Nesse ponto, o eixo analisado pela função de custo ponderado obedece ao critério e o valor de ponderação 4 estipulado para a área de PCH, apresentada na Figura 4.9 como um círculo com tom de verde mais escuro.

Ambos os eixos seguem um mesmo traçado ao longo de todo o município, diferenciando-se apenas nesse ponto da PCH. É possível notar que o percurso escolhido pela função de caminho de menor custo apresenta uma melhor opção, pois passa por áreas mais claras (menor resistência) e evita a área da barragem.

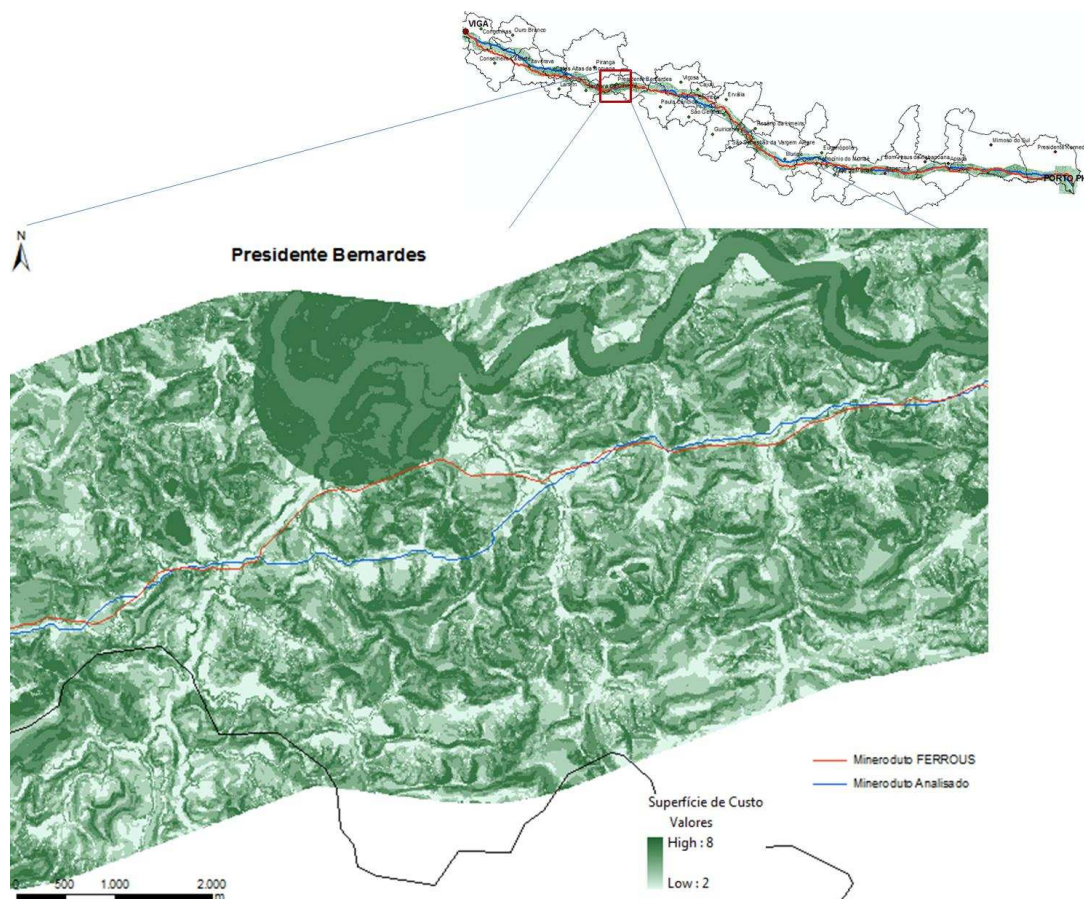


Figura 4.9 –Diferença entre eixos próximo área de PCH no município de presidente Bernardes, em Minas Gerais. Validação de critério de ponderação.

Esse ponto pode ser validado ao se analisar a terceira barragem existente no *buffer* da superfície de custo situado no município de Itaperuna, próximo ao limite com o município de Laje do Muriaé, ambos localizados no estado do Rio de Janeiro.

A Figura 4.10 mostra que o eixo preliminar da Ferrous não considerou a área de barragem ao traçar um possível trajeto para o mineroduto, enquanto o eixo gerado pela função de menor custo ponderado desvia dessa área evitando um maior custo e buscando uma menor resistência.

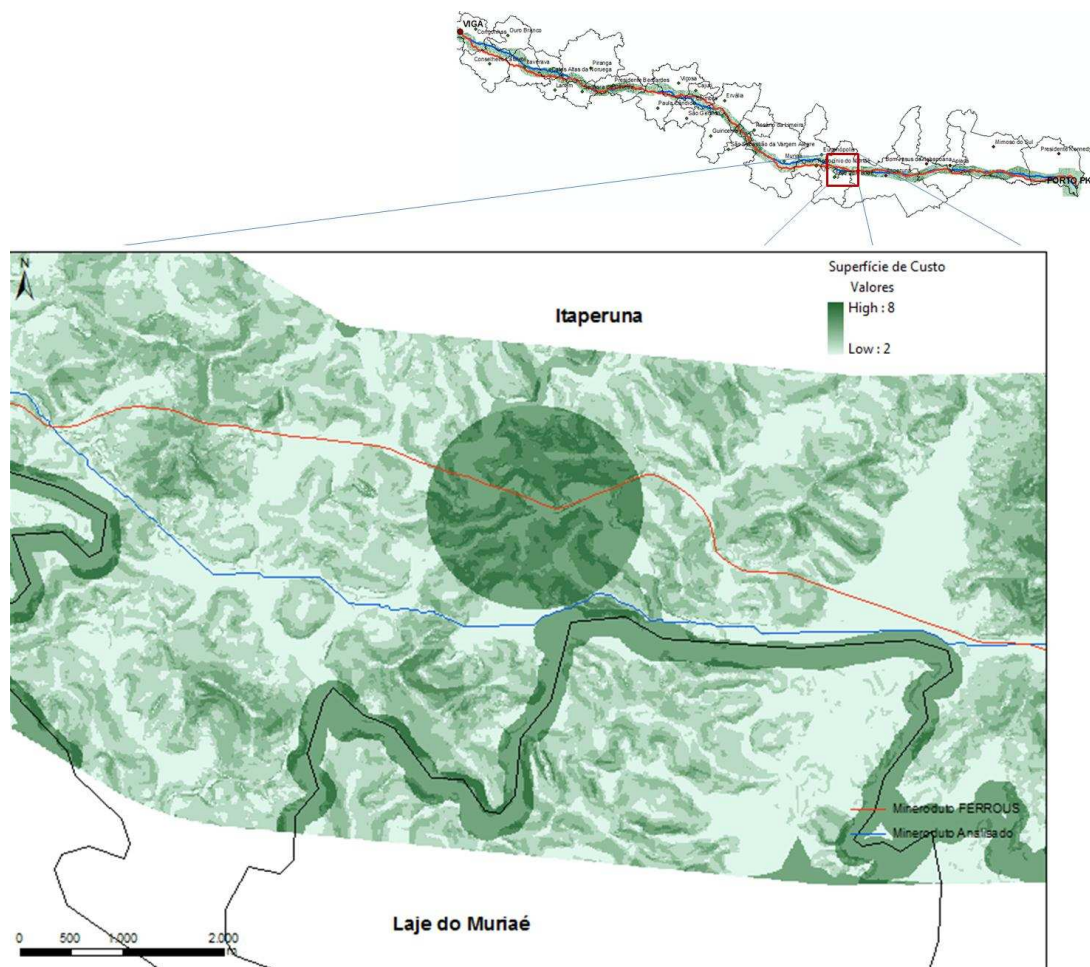


Figura 4.10 –Diferença entre eixos próximo área de PCH Comendador Venâncio no município de Itaperuna, no Rio de Janeiro. Validação de critério de ponderação.

Dos 400 km entre a mina de VIGA no município de Congonhas, em Minas Gerais, até o porto no município de Presidente Kennedy, no Espírito Santo, apenas 1/3 do traçado proposto pela Ferrous (aproximadamente 130 Km) é semelhante ao eixo gerado pela função de caminho de menor custo.

Os dois terços restantes (aproximadamente 270 Km) são discrepantes devido a diversos motivos, como a não consideração de alguns critérios por parte da Ferrous devido, por exemplo, a interesses distintos entre parceiros de projeto ou pontos de vista diversificados por parte dos membros do grupo de decisão.

Jankowski (1995) salienta que o processo de tomada de decisão, em várias instâncias, envolve um grupo de tomadores de decisão que representam, constantemente, interesses diferentes e conflitantes. Alguns exemplos como dilemas ambientais colocados por parte

da gerência ambientalista, ou por custo de operação pelos gestores econômicos e a própria operação de instalação do mineroduto.

Esse tipo de cenário não foge do dia a dia das empresas que oferecem serviço de consultoria. Alguns dos critérios considerados na análise multicritério nem sempre são fáceis de serem mensurados para uma ponderação. Ou seja, a análise multicritério deve considerar essas incertezas que tendem a dificultar o processo de tomada de decisão e devem ser utilizadas para a parte de refinamento dos resultados.

Tanto as diferenças no traçado quanto as partes semelhantes no trajeto, concomitantemente com a forma com que os dados são fornecidos para o estudo de caso dessa dissertação (porém aplicável a qualquer obra linear), ocorrem devido a alguns fatores importantes. A saber:

- Conflitos de interesse com superficiário;
- Ajuste de projeto – comprimento do eixo versus escavação em túnel, travessia especial e bacias hidrográficas.
- Maleabilidade das ponderações
- Forma de disposição dos dados - Extensão do *buffer*

Os superficiários podem ser, ou não, grandes problemas para a determinação de uma rota. Alguns deles podem facilitar a escolha do traçado enquanto outros podem dificultar. A justificativa para tal comportamento é diversificada. Entretanto, a tentativa de elevar o valor da terra é sempre um fator presente.

Por exemplo, alguns proprietários pedem para que o traçado passe em sua propriedade, pois acreditam que poderão se favorecer com algum tipo de renda mensal pelo uso da terra.

Existe, contudo, casos mais extremos em que o proprietário não permite a passagem do eixo do mineroduto e esse tem de ser desviado. Esse tipo de comportamento geralmente leva a atrasos de marcos de projeto e, portanto, opta-se pelo desvio conforme ilustrado na Figura 4.11.

A Figura 4.11 ilustra um exemplo de desvio do traçado da Ferrous, em vermelho, devido à posição negativa do superficiário em relação ao projeto.

Embora a função de caminho de menor custo tenha gerado um eixo mais retilíneo, alterações tiveram de ser feitas em alguns pontos do traçado. Esses desvios não são pontos

negativos, mas sim ajustes necessários de projeto. Porém, desvios extensos são também considerados gastos, pois voltas maiores levam a uma maior extensão do mineroduto.

De maneira geral, quanto mais retilíneo o traçado for, menor ele será. Entretanto, devido a questões geomorfológicas, do tipo de minério a ser transportado determinando a inclinação máxima do mineroduto, e por questões sociais (superficiais), alterações e desvios deve ser analisados.

Assim, ajustes de projeto devem ser estudados e analisados por uma equipe multidisciplinar, pois, embora a escavação em rocha seja considerada um método mais caro para a implantação de uma obra linear, ela pode, por vezes, ficar mais barata do que um contorno extenso devido a um afloramento rochoso, por exemplo.

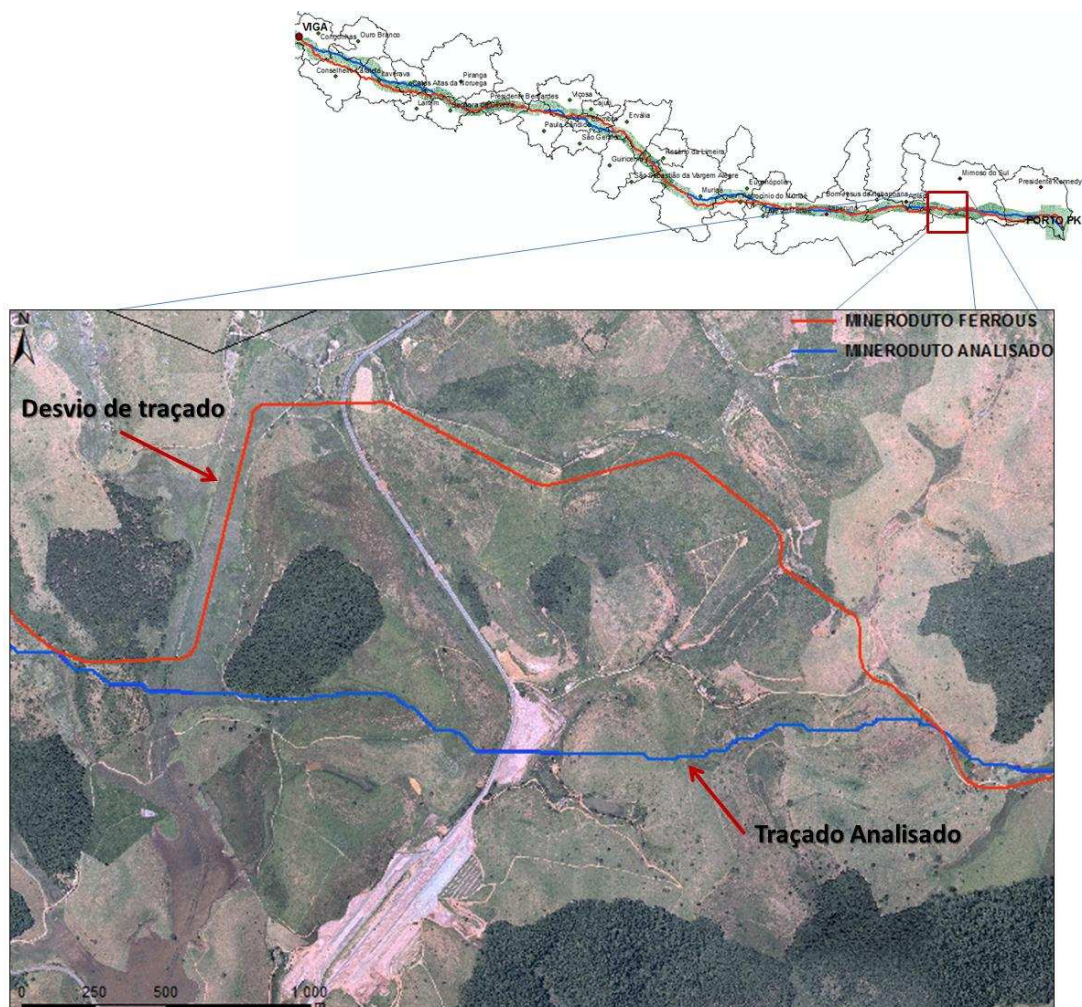


Figura 4.11 –Diferença entre eixos devido a problemas com superficial. O traçado da Ferrou (em vermelho) foi o adotado ao invés do traçado gerado pela função de menor custo (em azul).

Obras hidráulicas também devem ser levadas em consideração. As travessias especiais (em rios com grande largura) podem encarecer o projeto além de oferecerem maior dificuldade de implantação. Por vezes, desvios de rota podem utilizar passagens mais fáceis e de menor custo, além de diminuir ameaças potenciais ao eixo do mineroduto.

A delimitação de bacias hidrográficas foi empregada com o intuito de realizar um refinamento do traçado em uma escala maior. Isso foi muito importante para determinar ajustes ao longo do trecho do mineroduto.

Por vezes, o traçado proposto localizava-se no exutório da bacia. Esse tipo de situação é prejudicial, pois pontos potencialmente problemáticos dentro da bacia hidrográfica, os quais apresentam processos erosivos correlacionados com alta declividade, podem ameaçar a integridade do duto, uma vez que todo o escoamento superficial e possíveis corridas de lama da bacia convergem para o seu exutório.

Segundo Pruski (2006), quanto maior a área de declividade da bacia, maior deverá ser a vazão máxima de escoamento superficial que ocorrerá na seção de deságue da bacia (exutório), e quanto mais a forma da bacia aproxima-se do formato circular, mais rápida deverá ser a concentração do escoamento superficial e, conseqüentemente, maior deverá ser a sua vazão máxima.

A Figura 4.12 ilustra a correlação dessas informações e fornece a identificação de áreas vulneráveis que necessitam de uma atenção especial em campo, uma vez que é possível visualizar áreas de declividades significativas (acima de 20%) associadas com feições erosivas.

Isso ocasionou modificações, refinamento, do eixo a fim de se evitar tais pontos críticos. Este é um ponto importante para antever gastos e obras remediadoras ao longo do tempo do mineroduto.

Em uma primeira abordagem foi realizada a delimitação automática das bacias hidrográficas. Entretanto, esse processo generaliza demasiadamente as regiões que formam as bacias de drenagem e, portanto, deixa de delimitar bacias menores.

Para que a delimitação das bacias atendesse e, portanto, cobrisse possíveis alterações de traçado sem sobrepor ou sotopor a escala de trabalho, essa atividade foi realizada manualmente, pois a experiência e habilidade do analista puderam conferir um resultado satisfatório ao processo.

Isso ocasionou modificações, refinamento, do eixo a fim de se evitar tais pontos críticos. Este é um ponto importante para antever gastos e obras remediadoras ao longo do tempo do mineroduto.

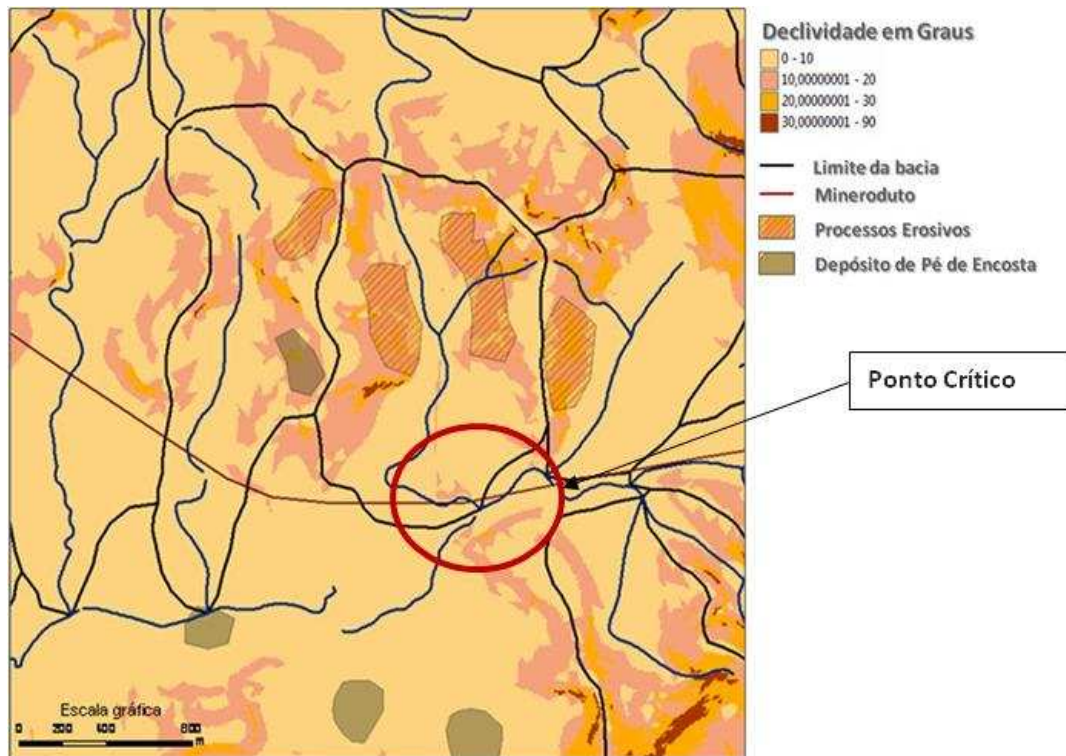


Figura 4.12 –Áreas erosivas (parte hachurada na imagem) presentes em alta declividade. O eixo do mineroduto (em vermelho) passando no exutório da bacia. Área de modificação de projeto.

A criação de um MDT (modelo digital de terreno) contribuiu na demarcação das micro-bacias, além de auxiliar na melhor percepção da forma do terreno, permitindo uma melhor qualidade no processo de aquisição da informação, principalmente quando vistas em 3D.

A Figura 4.13 apresenta um MDT associado com a delimitação de micro bacias. A utilização do MDT também foi útil para melhor percepção da forma do terreno. A análise da morfologia do terreno permitiu modificações ao longo do eixo com o intuito de se evitar grandes cortes no terreno, o que geraria grandes taludes, e evitar grandes inclinações no eixo, o que poderia levar a ruptura do mesmo devido à pressão com que o minério atingiria um ponto mais baixo ou a acúmulo do mesmo por impossibilidade de subir altos declives.

No item 4.2, os valores referentes às ponderações aqui apresentadas são resultantes do trabalho de diversos profissionais, podendo variar conforme objetivos de projeto, gestão e importância dos fatores no contexto em que o projeto se encontra.

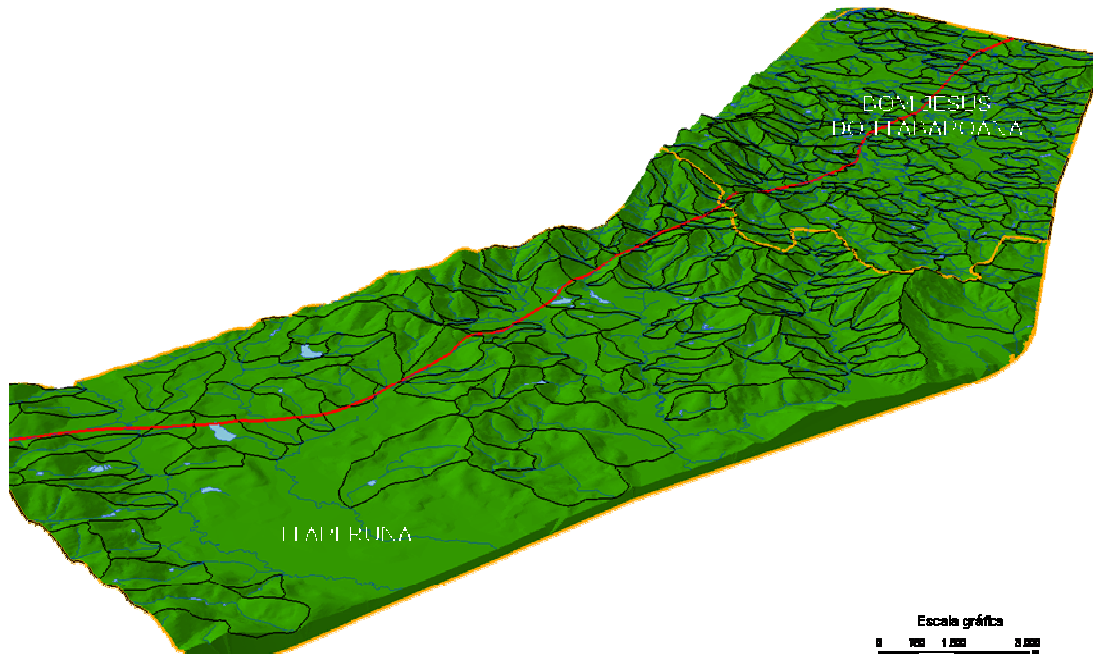


Figura 4.13 – Modelo digital de terreno apresentando a delimitação de micro bacias (em preto) e o eixo do mineroduto (em vermelho).

Assim, o somatório do contexto geológico, pedológico, ambiental, de engenharia, e até mesmo político, é que vai determinar a forma como a equipe de projeto deve valorar cada superfície de fricção, para que esta gere uma superfície de custo total.

Por último, acredita-se que a extensão dos dados fornecidos, principalmente a topografia, pode influenciar o resultado de um traçado ótimo para uma obra linear. Uma maior área de cálculo representa uma maior possibilidade de escolha para melhor trajeto. Assim, deve-se ter sempre em mente que uma área (*buffer*) restrita pode influenciar no resultado do eixo gerado pela função de menor custo.

4.5 Conclusão

Este capítulo apresentou os resultados da análise da função de caminho de menor custo para o mineroduto da Ferrous Ressources do Brasil S/A.

Após a aplicação do algoritmo para determinar o caminho de menor custo pode-se dizer que os resultados apresentados atenderam às expectativas de projeto, uma vez que o traçado apresentado obedece à morfologia mais adequada.

Por morfologia mais adequada entendem-se regiões geomorfológicas e geotecnicamente mais favoráveis a instalação do mineroduto. Isso mostra que os fatores de ponderação (pesos) foram estimados de forma satisfatória.

5. CONCLUSÃO

Esta dissertação apresentou uma análise de percurso de menor caminho realizada por uma adaptação do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para valorar os critérios e criar uma superfície de custo; utilizando a ferramenta *Least Cost Path* do software ArcGIS para gerar um traçado ótimo a partir de uma superfície de custo ponderado.

Conforme mencionado por C. Yu *et al.* (2003), um caminho de menor custo ou traçado ótimo não existe. Apenas traçados ótimos relativos podem ser considerados dentro de certas condições. Conforme explicado no capítulo anterior, os parâmetros apresentados e a forma como são valorados podem alterar significativamente os resultados de caminhos de menor custo.

Uma vez que as ponderações podem ser modificadas ou de acordo com a etapa do projeto, ou por ajustes do mesmo, diversos traçados podem ser gerados e comparados entre si, e assim escolher o ótimo traçado dentre os ótimos traçados gerados.

O processo de escolha das ponderações se deu como resultado das associações entre cada critério (comparação par a par) a partir do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Isso permitiu aos tomadores de decisão validarem a escolha de peso para cada feição. Entretanto, cada valor reflete não só as experiências profissionais e resultados de modelos, mas como o contexto temporal em que projeto se encontra.

Comparando-se o traçado preliminar apresentado pela Ferrous e o traçado gerado pela função de caminho de menor custo é possível escolher a opção que melhor atende as necessidades do projeto, buscando os melhores resultados com o menor custo de implantação.

Desta forma, este trabalho cumpriu com seus objetivos uma vez que (1) possibilita o auxílio nas tomadas de decisões, (2) permite escolher um melhor traçado para o mineroduto por meio da ferramenta apresentada e (3) permite comparar os possíveis traçados com a realidade da área diretamente afetada pelo empreendimento.

Contudo, algumas limitações fazem com que os resultados possam vir a ser melhorados. Quanto mais completa for a entrada de dados, mais próximo da realidade será o modelo. Este trabalho, que é fruto de um projeto de geologia de engenharia, buscou utilizar os dados fornecidos pela Ferrous, com pouca complementação de arquivos, para seguir,

relativamente da mesma forma, o que foi elaborado no projeto preliminar do traçado da Ferrous.

Tal postura objetivava um resultado, no mínimo semelhante, porém apresentando um ganho de tempo, de custos e de pessoal. Porém, mais dados (critérios) poderiam ter sido incluídos nas análises, e que não foram por questões de tempo de projeto.

A área de estudo (*buffer* da topografia) é relativamente estreita e uma área maior poderia sugerir um outro percurso.

Um aspecto muito importante alcançado nessa dissertação é a percepção de que os trabalhos de campo relativos a esse tipo de projeto podem ser melhor elaborados, mais objetivos e dinâmicos pelo uso mais frequente tanto dos métodos de análise multicritério como da função de caminho de menor custo. Como pôde ser visto nessa dissertação, a união de tais métodos permite maior sofisticação e melhores resultados ao se fazer uma análise espacial.

Assim, após a aplicação desses métodos, o mapeamento de campo para validação do traçado e ajustes de projeto será sem dúvida mais objetivo e com melhores resultados. Entre a concepção de um traçado ótimo e o seu projeto executivo há um longo caminho a ser percorrido, e mudanças deverão ocorrer.

Uma análise que pode ser feita, para maior refinamento do traçado, é refazer o caminho de menor custo apresentado nessa dissertação com a aplicação do *Smart Terrain (ST) Algorithm* apresentado por C. Yu *et al.* (2003), pelo qual se consegue ligar pontos não adjacentes da malha matricial com o intuito de estimar pontes (no caso do mineroduto passagens aéreas) ou túneis para o mineroduto a fim de se evitar longos desvios.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica - <http://www.aneel.gov.br/>- Consulta em: 23 de junho de 2011

ANTUNES, A. F. B.; LINGNAU, C. (2005) - Determinação da acurácia temática de dados oriundos da classificação digital de objetos por meio de lógica fuzzy. *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3451-3459.

AUGUSTO FILHO, O., HIRAI, J. N., OLIVEIRA, A. S., LIOTTI, E. S. (2010) - GIS applied to geotechnical and environmental risk management in a Brazilian oil pipeline. 7 August 2010. *Springer - Verlag* 69 p. 631 - 641

CASANOVA, M. A.; CAMARA, G.; DAVIS Jr., C. A.; VINHAS, L.; QUEIROZ, G. R. de. (2005) - Banco de Dados Geográficos. Curitiba: MundoGEO.

CHRISTOFOLETTI, A. (1980) - Geomorfologia. 10ª reimpressão (2007) – São Paulo, SP Editora Bluncher

COLLISCHONN, W.; PILAR, J. V. (2000) – A Direction Dependent Least Cost Path Algorithm for Roads and Canals – *International Journal of Geographical Information Systems*.

CHOI, Y. PARK, H-D; SUNWOO, C; Clarke, K. C. (2008) - Multi-criteria evaluation and least-cost path analysis for optimal haulage routing of dump trucks in large scale open-pit mines. - *International Journal of Geographical Information Science*, 23:12, 1541 - 1567, 24 de Novembro.

DNPM – Departamento nacional de Produção Mineral - <http://www.dnpm.gov.br/>- Consulta em: 05 de julho de 2011

DODGSON, J.; SPACKMAN, M.; PEARMAN, A.; PHILLIPS, L. (2001) - DTRL multi-criteria analysis manual. DTRL – Department for Transport, Local Government and the Regions, Reino Unido.

DOUGLAS, D. H., (1993) - Least Cost Path in Geographic Information Systems, *Research Note* No. 61 – Ottawa: Department of Geography, University of Ottawa.

ESRI – Environment Systems Research Institute (2009) – Apostila Spatial Analyst. Advanced Raster Spatial Analysis.

FERROUS Resources do Brasil S/A e BRANDT (2010) – Mineroduto Ferrous – Minas Gerais, Rio de Janeiro e Espírito Santo - Relatório de Impactos Ambientais (RIMA).

FONSECA, F. P. et al. (2006) - Olhar geográfico: o conhecimento do planeta Terra. São Paulo: IBEP.

FOTHERINGHAM, A. S.; WEGNER, M. (2000) - Spatial Models and GIS - New Potential and New Models. *GISDATA 7 Series Editors I.* Masser and F. Salgé – Taylor & Francis.

GUIMARÃES, P. L., JIMÉNEZ-RUEDA, J. R., MATTOS, J. T. de, DAITX, E. C., MOURA, C. A. de, COELHO, J. O. M. (2007) - Zoneamento Geoambiental como Subsídio à Análise dos Indicadores Ambientais nas Áreas de Dutos: Caracterização Geoquímica e Mineralógica das Frações Finais das Coberturas de Alteração Intempéricas. *4 PDPETRO*, Campinas, SP.

GUTIÉRREZ, G. Z., CABRALES, J. A., LECHUGA, C., RUBIO, A. O., (2002) - Environmental Quantitative Assessment of Two Alternative Routes for a Gas Pipeline in Mexico. *Landscape and Urban Planning* 59 p. 181-186

GUY, M. (1966) - Quelques principes et quelques expériences sur la methodologie de la photo-interpretation. *Acte du 11 Symposiun International de Photo-Interpretation*, vol. 1, págs. 21 - 41, Paris.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística -<http://www.ibge.gov.br/home/>-
Consulta em: 17 de junho de 2011

JANKOWSKI, P. (1995) – Integrating Geographical Information Systems and Multiple criteria decision-making methods. *International Journal of Geographical information Systems*, 9:3, 251-273.

JIANYUAN, Y. (1992) – Using Analytic Hierarchy process as the auxiliary decision of computer integrated system for library management (CISLM). Nankai University, China.

KOCHEN, R. (2006) - *Dutos e Obras Lineares* – Condicionantes Geotécnicos de Projeto e Construção - *GeoCompany Tecnologia, Engenharia & Meio Ambiente*, Barueri, SP, Brasil.

KUMAR, N. (2003) – Data Quality and Flow of Errors in GIS. Survey of India, Chandigarh - *Indian Cartographer*.

LEE, J.; STUCKY, D. (1998) – On Applying Viewshed Analysis for Determining Least Cost Path on Digital Elevation Models. *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 12, No 8, 891 - 905

LOPES, E. S. S. (2005) - Tutorial 10 Aulas - SPRING 4.2. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

MALCZEWSKI, J. (a) (2006) – Integrating multicriteria analysis and geographic information systems: the ordered weighted averaging (OWA) approach. *International Journal of Environment technology and Management*, Vol. 6.

MALCZEWSKI, J. (b) (2006) – GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20: 7, 703 – 726.

MMA – Ministério do Meio Ambiente - <http://www.mma.gov.br/sitio/> - Consulta em: 23 de junho de 2011

Manual do SPRING – Tutorial de Geoprocessamento. <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html> - Consulta em 05 de maio de 2011.

MARSHALL, R. G. & RUBAN, T. F. (1983) - Geotechnical Aspects of Pipeline Construction in Alberta. *Canadian Geotechnical Journal*.V-20, p.1-10.

MOGHADDAM, H. K.; DELAVAR, M. R. (2007) – A GIS-based Pipelining Using Fuzzy Logic and Statistical Models. IJCSNS – *International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 7 No. 2.

PORTO, C. G. (2006) – Intemperismo em regiões tropicais. *Geomorfologia e meio ambiente* – Antônio José Teixeira Guerra e Sandra Baptista da Cunha (organizadores). – 6ª edição – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA; SILVA, D. D.; (2006) - Escoamento Superficial. Editora UFV, 1ª reimpressão. – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.

RIVERAU, J. C. (1972) - Notas de aula do curso de fotointerpretação - Publicado - pela Soc. Intern. Cult. Esc. Geol. (Ouro Preto) em XI Semana de Estudos.

RODRIGUES, A. F.; POLIVANOV, H.; SILVA, J. X.; OLIVEIRA, W. J. (2005) - Avaliação Geotécnica e Ambiental da Zona de Influência do Duto Petrolífero no Município de Mangaratiba (RJ) com a utilização da Técnica de Avaliação do Terreno. In: *Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*. 2 a 5 de Outubro. Salvador, Bahia. CD-ROM.

ROSS, J. L. S. (2000) – Geografia do Brasil. Editora da Universidade de São Paulo, 3ª edição.

SCHMIDT, Â. M. A. (1995) - Processo de apoio à tomada de decisão – Abordagens: AHP e MACBETH. Dissertação (Mestrado). UFSC, Florianópolis. Disponível em: <www.eps.ufsc.br/disserta/engait95.html>. Consulta em: 06 agosto. 2011.

SILVA, Reginaldo Macedônio da. (2007) - Introdução ao Geoprocessamento: Conceitos, Técnicas e Aplicações. Novo Hamburgo. Editora Feevale. 176p.

SOARES, P. C.; FIORI, A. P. (1976) - Lógica Sistemática na Análise e Interpretação de Fotografias Aéreas em Geologia. *Notícias Geomorfológicas*, 16(32): 71-104.

SOUZA, L. B. & FIORI, A. P. (2007) - Método de Fotointerpretação para Zoneamento Geotécnico em Estudos de Dutos Terrestres. In: *Anais do 6º Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental*. 04 a 06 de Junho. Uberlândia, Minas Gerais. p. 602-615.

STEIGUER, J. E.; DUBERSTEIN, J.; LOPES, V. (2005) - The Analytic Hierarchy Process as a Means for Integrated Watershed Management. Disponível em: <<http://www.tucson.ars.ag.gov/icrw/Proceedings/Steiguer.pdf>>. Consulta em: 07 Agosto 2011.

TOMA, T.; ASHARIF, M. R. (2003) - AHP coefficients optimization technique based on GA. Department of Information Engineering of University of Ryukyus, Japão.

VILAS BOAS, C. L. (2011) – Método Multicritério de Análise de Decisão (MMAD) para as Decisões Relacionadas ao Uso Múltiplo de Reservatórios: Analytic Hierarchy Process (AHP). UnB/FACH – Universidade de Brasília.

YU, C., LEE, J., MUNRO-STASIUK, M. J. (2003) – Extensions to least-cost path algorithms for roadway planning – *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 17, № 4, 361 – 376.